



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

# INTELIGENTNÍ SENZORICKÁ SÍŤ NAVRŽENÁ PRO SPECIFIKACI 802.15.4 (BETA APLIKACE)

INTELLIGENT SENSORY NET DESIGNED ON THE STANDARD IEEE 802.15.4

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. TOMÁŠ JANŠTA

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. RADOMIL MATOUŠEK, Ph.D.

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automatizace a informatiky

Akademický rok: 2008/2009

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Tomáš Janšta

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Aplikovaná informatika a řízení (3902T001)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

**Inteligentní senzorická síť navržená pro specifikaci 802.15.4 (beta aplikace)**

v anglickém jazyce:

**Intelligent Sensory Net designed on the standard IEEE 802.15.4**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Daná diplomová práce je poměrně komplexní úlohou v dosud velmi evoluční oblasti budování senzorických sítí. Cílem práce je navrhnout a implementovat metodiku pro vybudování inteligentní sítě aktivních senzorických prvků. Vzhledem k rozsahu i povaze zadání se předpokládá spíše "pilotní" řešení, přesto realizované do funkčního celku. V práci bude zásadně uplatněna technologie 802.15.4 implementovaná prostřednictvím modulů XBee, na straně senzorů bude využit MCU třídy ATMEL AVR.

Cíle diplomové práce:

- a, Rešerše a stručný popis technologie ZigBee vzhledem k následnému řešení.
- b, Stručný popis zvolených (požadavek školitele) modulů XBee, porovnání HW Series I a Series II.
- c, Teoretický návrh a praktická realizace inteligentní sítě (ovládání koncových zařízení, dále dle typu sítě možnost: optimalizace topologie, identifikace zisku signálu, alarm dle požadavku na šířku přenosového pásma apod.)  
point-to-point, point-to-multipoint a Mesh (pokud bude zvolen i modul XBee Series II.), s konektivitou k hlavní řídicí jednotce představující PC (na straně PC vytvoření základní knihovny, případně GUI pro řízení a monitorování systému).
- d, Na straně aktivních senzorů bude učiněn návrh pro ovládání, resp. zpracování informací z koncových zařízení (senzorů a dalších prvků).

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce je soustředěna na bezdrátový přenos dat dle standardu IEEE® 802.15.4 využitím modulárních konstrukčních prvků. Prezentovaná platforma spojuje výhody bezdrátových modulů XBee® a vývojového systému s mikrokontrolérem AVR ATmega128. Základním požadavkem zadavatele byl návrh a realizace prototypu vestavné platformy pro bezdrátové šíření malých objemů řídicích a senzorických dat mezi uzly sítě a bránou do jiných sítí. Řídicí programové vybavení je vyvinuto pro operační systém TinyOS. Vyvinutá platforma je výchozí pro další vývoj a případné rozšíření funkcionality v příbuzných aplikacích.

Práce bude zahrnuta jako součást řešení výzkumného záměru Inteligentní systémy v automatizaci podporovaného MŠMT ČR pod registračním číslem MSM 0021630529.

## **ABSTRACT**

This thesis focuses on design of wireless network nodes using modular construction parts with respect to IEEE® 802.15.4 standard. Presented platform joins the benefits of the XBee® wireless module and the AVR ATmega128 microcontroller development system. Sensor network prototype is designed to meet the desired first attempt functionality of embedded platform for collection and delivery of small volumes of control and sensor data between the network and the gateway. The control software was developed for TinyOS operating system. Designed platform is used as the framework for future development and possible functionality extensions in related applications.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Bezdrátová senzorická síť, IEEE802.15.4, XBee, ZigBee, ATmega128, TinyOS, řídicí systém, robotika, dálkové řízení

## **KEYWORDS**

Wireless Sensor Network, IEEE802.15.4, XBee, ZigBee, ATmega128, TinyOS, control system, robotics, remote control

Děkuji tímto vedoucímu diplomové práce Ing. Radomilu Matouškovi, Ph.D.,  
za poskytnutí odborných rad,

mým rodičům za jejich podporu a možnosti, jichž se jim nedostalo,

mé ženě Šárce a dceři Elišce za podporu a naději.

Prohlašuji, že tato diplomová práce je mým autorským dílem. Všechny použité zdroje a literaturu v práci řádně cituji uvedením odkazu na příslušný zdroj.

V Brně dne 29. 5. 2009



# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>1</b>
1.1	Téma práce . . . . .	2
1.2	Cíl práce . . . . .	3
1.3	Obsah kapitol . . . . .	3
1.4	Související práce a zdroje . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Bezdrátové senzorické sítě</b>	<b>5</b>
2.1	Charakteristiky bezdrátových senzorických sítí . . . . .	7
2.2	Výhody bezdrátových senzorických sítí a související omezení . . .	8
2.3	Oblasti použití senzorických sítí . . . . .	10
2.4	Funkční vlastnosti BSS . . . . .	10
2.5	Třídy platforem BSS . . . . .	10
2.6	Návrh sítí senzorů . . . . .	11
<b>3</b>	<b>Standard IEEE® 802.15.4</b>	<b>15</b>
3.1	Standard IEEE® 802.15.4 v pásmu 2,4 GHz . . . . .	15
3.2	Vybrané definice standardu IEEE® 802.15.4 . . . . .	16
3.2.1	Definice zařízení standardu IEEE® 802.15.4 . . . . .	16
3.2.2	Síťové topologie standardu IEEE® 802.15.4 . . . . .	16
3.2.3	Definice fyzické vrstvy PHY standardu IEEE®802.15.4 . . .	19
3.2.4	Alokace frekvencí v pásmu ISM 2,4 GHz . . . . .	21
3.2.5	Koexistence v kmitočtovém pásmu ISM 2,4 GHz . . . . .	22
3.2.6	Definice vrstvy MAC . . . . .	22
3.2.7	Vrstvy nadřazené MAC IEEE802.15.4 . . . . .	23
3.2.8	Mechanismus CSMA-CA v sítích PAN . . . . .	23
3.2.9	Metody pro zvýšení spolehlivosti přenosu . . . . .	24
3.3	Šíření elektromagnetických vln v pásmu 2,4 GHz . . . . .	24
3.3.1	Charakteristika síly signálu . . . . .	25
3.3.2	Závislosti změny síly signálu . . . . .	26
3.4	Antény . . . . .	27
3.5	Legální podmínky pro zařízení IEEE®802.15.4 . . . . .	29
<b>4</b>	<b>Moduly bezdrátové komunikace XBee® a XBee-PRO®</b>	<b>33</b>
4.1	Přehled vlastností modulů XBee® Series I . . . . .	34
4.1.1	Porovnání modulů XBee® Series I a XBee® Series II . . . . .	34
4.1.2	Moduly XBee®/XBee®PRO DigiMesh2.4 . . . . .	34

4.1.3	Mechanické provedení a signály modulů XBee® . . . . .	37
4.2	Sítě XBee® . . . . .	37
4.2.1	Peer-to-Peer (P2P) sítě XBee® . . . . .	38
4.2.2	Koordinované sítě XBee® . . . . .	38
4.2.3	Adresování v sítích XBee® . . . . .	38
4.2.4	Pracovní módy XBee® . . . . .	39
<b>5</b>	<b>Realizace prvků sítě</b>	<b>43</b>
5.1	Koncepce a návrh technického vybavení . . . . .	43
5.1.1	Konstrukční prvky . . . . .	43
5.1.2	Nástroje pro vývoj . . . . .	44
5.1.3	Realizace . . . . .	45
5.1.4	Adaptér propojení . . . . .	45
5.1.5	Připojení modulů XBee® . . . . .	49
5.2	Koncepce a návrh programového vybavení . . . . .	49
5.2.1	Operační systémy pro bezdrátové senzorické sítě . . . . .	50
5.2.2	Výběr operačního systému . . . . .	52
5.2.3	Operační systém TinyOS . . . . .	53
5.2.4	Nástroje pro vývoj a programování . . . . .	55
5.2.5	Platforma XBeeAT pro TinyOS . . . . .	55
5.2.6	Ovladače . . . . .	57
5.2.7	Testování funkcí platformy . . . . .	61
5.2.8	Konfigurace uzlů . . . . .	62
5.2.9	Návrh komunikačního rozhraní . . . . .	62
5.2.10	Topologie a směrování . . . . .	63
5.2.11	Návrh sběru dat a vizualizace . . . . .	64
5.2.12	Měření chybovosti paketů . . . . .	67
<b>6</b>	<b>Závěr</b>	<b>69</b>
	<b>Literatura</b>	<b>71</b>
	<b>Seznam obrázků</b>	<b>75</b>
	<b>Seznam tabulek</b>	<b>77</b>



# 1 Úvod

V procesu budování elektrických přenosových tras a sítí se vychází z požadavku spolehlivého přenosu signálů z místa měření (zdroje signálu, senzoru) do cílového místa vyhodnocení se zachováním původních vlastností signálu, tedy vytvoření hodnotové repliky tohoto signálu v čase. V dobách počátku budování přenosové techniky byly signály přenášeny převážně ve formě původní, analogové. V dnešní době preferujeme přenos diskrétních hodnot vzorkováním spojitých analogových veličin v čase. Tato diskretizace (digitalizace) přináší mnoho výhod. Transformujeme dynamický rozsah původního analogového signálu na diskrétní hodnoty v rozsahu, nutném pro přenos bez ztráty informace, abychom minimalizovali vliv omezeného dynamického rozsahu, nepříznivých vlastností přenosové trasy a časové proměnlivosti parametrů prvků sítě.

Tyto sítě pro přenos digitálních signálů jsou pak navrhovány s ohledem na potřebnou topologii, spolehlivost, zabezpečení, rychlost přenosu a dostupnou šířku pásma, někdy i s využitím původních analogových metalických nebo bezdrátových instalací.

Mohutným výzkumem a rozvojem polovodičové techniky, zejména digitálních signálových procesorů, mikroprocesorů a integrovaných senzorů se radikálně mění nejen možnosti a přístup ke zpracování a interpretaci různých veličin, ale i možnosti jejich přenosu. Vidíme tento fenomén nyní již v běžném životě, například rozšiřováním funkcionality mobilních telefonů a spotřební elektroniky, využitím možností signálových procesorů v přenosových cestách, vyšší hustotou aktivních prvků na jednotku objemu, způsoby dynamické alokace a využití přenosového kanálu (kognitivní rádio), v procesech komplexní modulace a demodulace (např. softwarově definované rádio, SDR). S rozvojem technologií se rozšiřují a optimalizují způsoby přenosu signálů především elektromagnetickými signály, zejména ve vysokofrekvenční (SHF) a optické oblasti spektra.

Sítě odlišujeme podle potřeby pokrytí oblasti, podle zabezpečení spolehlivosti, kvality, rychlosti přenosu dat, podle typu přenášených signálů (informací). Senzorické sítě, jak vyplývá z názvu, speciálně přenášejí signály získané senzory.

Senzory najdeme prakticky v každé oblasti našeho života. Využívají se v různých oborech pro měření elektrických i neelektrických veličin, v průmyslu např. pro řízení procesů, strojů, robotů, v lékařství pro měření životních funkcí, v zabezpečovací technice pro sledování osob a objektů.

Rozšíření těchto sítí také závisí na vývoji nových senzorů (snímačů, čidel). Tento vývoj je díky pokroku v technologiích stále úspěšný a to jak z hlediska rozšíření

aplikačních oblastí (např. zrychlení, poloha, chemická analýza, atd.), tak i z hlediska požadavků na jejich parametry (např. na citlivost, přesnost, rychlost odezvy, spotřebu energie, rozměry). Dalším krokem v jejich vývoji je zpracování získaných dat z vlastního senzoru přímo v místě instalace (integrovaným procesorem) a to umožňuje, aby výstupní signál byl ve volitelné formě a co nejlepší kvality pro přenos. Pro senzorické sítě je z hlediska kontroly kvality a uživatelských nákladů kladen důraz na spolehlivý bezúdržbový provoz a minimální spotřebu energie.

### 1.1 Téma práce

Zadání diplomové práce je zaměřeno na bezdrátový přenos dat s využitím diskrétních konstrukčních prvků především v oblasti robotiky na Ústavu automatizace a informatiky VUT FSI.

Bezdrátové senzorické sítě (WSN, Wireless Sensor Networks) chápeme jako sítě senzorů komunikujících signalizací přenášenou jinak než stabilními (stacionárními) transportními médii (metalickými či optickými).

Pojem inteligentní bezdrátová senzorická síť (Smart WSN) reprezentuje technické řešení:

- ▷ sběru senzorických dat, případně jejich částečné zpracování (filtrace, komprimace, apod.) a dočasné uchování v místě měření,
- ▷ transport dat prostřednictvím bezdrátové sítě,
- ▷ doručení, kolekce dat do místa sběru (brány, centrálního uzlu),
- ▷ další zpracování, interpretace a skladování dat v místě potřeby, případně doručování akčních instrukcí prostřednictvím zařízení podporujícím zpracování takových dat a signálů.

Inteligentním zpracováním v tomto smyslu rozumíme:

- ▷ zpracování signálů: vzorkování, převod úrovně, filtrace, komprimace, transformace, numerické operace, normalizace,
- ▷ zpracování informace: proces operací s upravenými signály, jejich transformace a interpretace, operace s nenumerickými informacemi a jejich prezentace.

V literatuře, zabývající se touto tematikou, se užívá tohoto termínu také v souvislosti se systémy používajícími takzvané inteligentní agenty. Inteligentní agenti jsou softwarové systémy přijímající data, rozhodující, konající a komunikující podobně jako lidé. V praxi je často žádoucí, aby agenti v tomto kontextu vykonávali následující úkoly:

- ▷ klasifikace dat,
- ▷ odhadování,

- ▷ testování hypotéz,
- ▷ statistické a heuristické zpracování.

a používající přitom například těchto nástrojů umělé inteligence: expertní systémy, neuronové sítě, fuzzy logiku, statistické učení, genetické algoritmy.

## 1.2 Cíl práce

Základním záměrem zadavatele je získat funkční vzorek či prototyp vestavné platformy pro bezdrátové šíření malých objemů řídicích a senzorických dat mezi jednotlivými uzly sítě a bránou do jiných sítí (osobním počítačem).

Výchozí pojetí návrhu je zaměřeno na reprodukovatelnost, dostupnost levných vývojových nástrojů a otevřený přístup ke zdrojům. Rozsah budované sítě není zatím specifikován, se zřetelem na možnosti zadavatele a daného technického vybavení je vhodné počítat s možností dynamicky budované sítě.

Tato platforma bude vycházet pro další vývoj a případné rozšíření pro použití v řídicích aplikacích, zejména v robotice v Ústavu automatizace a informatiky. Sít'ová infrastruktura bude konstruována ze specifických komponent vybraných zadavatelem. Výběr všech konstrukčních prvků byl zaměřen na prvky běžně dostupné na českém trhu a jejich nízké pořizovací náklady. Programové vybavení není zadáním specifikováno, bude výsledkem intenzivního průzkumu vhodných variant a experimentů vedoucích ke generování vlastního programového kódu konkrétních aplikací.

V rozsahu realizace úkolů této diplomové práce bude smysl pojmu "Inteligentní bezdrátová senzorická síť" vymezen, neboť rámec možností a disciplín je příliš rozsáhlý a reálné požadavky zadavatele přesahuje.

## 1.3 Obsah kapitol

Úvodní kapitoly poskytnou stručný přehled problematiky bezdrátových senzorických sítí.

Třetí kapitola se věnuje stručnému popisu standardu IEEE® 802.15.4 pro bezdrátové senzorické sítě.

Čtvrtá kapitola seznamuje s uživatelskými a technickými parametry modulů XBee® a srovnává jejich varianty.

Popis praktické realizace funkčního vzorku prvků sítě je uveden v kapitole páté.

### 1.4 Související práce a zdroje

Problematika bezdrátových senzorických sítí je relativně rozsáhlá a zasahuje i do nesouvisejících oborů. Jako příklad lze uvést výzkum nových zdrojů energie dodávané přirozeným prostředím (fluidní mechanika, termodynamika) pro napájení senzorických uzlů umístěných na nepřístupných místech.

Průzkumem informačních zdrojů jsem získával poznatky a přehled o úrovni vědy a průmyslu v tomto oboru, z dostupných zdrojů vychází najevo, že velmi intenzivní výzkum probíhá v nalézání nových komunikačních metod a protokolů, hledání a testování efektivních síťových protokolů [42, 47], vývoj polovodičových obvodů pro bezdrátovou komunikaci podle standardu IEEE802.15.4. se zaměřením na vyšší hustotu integrace a funkcionality, například polovodičové prvky firem Freescale [34], Texas Instruments (dříve Chipcon), Atmel a Ember.

V komerční sféře působí řada výrobců, nabízejících již síťové komponenty připravené k instalaci v terénu [43, 33, 31].

Příbuzné publikace v kontextu tématu této práce jsou dostupné téměř výhradně v oblasti akademických zdrojů [30], [17].

Nejdůležitějšími zdroji pro praktickou i teoretickou stránku práce byla dokumentace k použitým konstrukčním komponentům, práce zaměřené na podobné aplikace a zejména dokumentace a diskusní skupiny pro podporu operačního systému TinyOS [26] [37]. Prostudování dokumentace, pochopení architektury operačního systému TinyOS a rychlé prototypování s laděním kódu bylo nejnáročnější etapou práce.

## 2 Bezdrátové senzorické sítě

*„Zkuste to bez drátů, milý Marconi!“*

*Jaroslav da Cimrman*

Bezdrátové senzorické sítě (BSS, anglicky: WSN, wireless sensor networks), reprezentují výrazně se rozvíjející oblast konvergence senzoriky a bezdrátových komunikací. [49]

Systém bezdrátové senzorické sítě lze také definovat jako kolekce minimalistických, na okolí energeticky nezávislých, prostorově oddělených, kooperujících jednotek, integrujících:

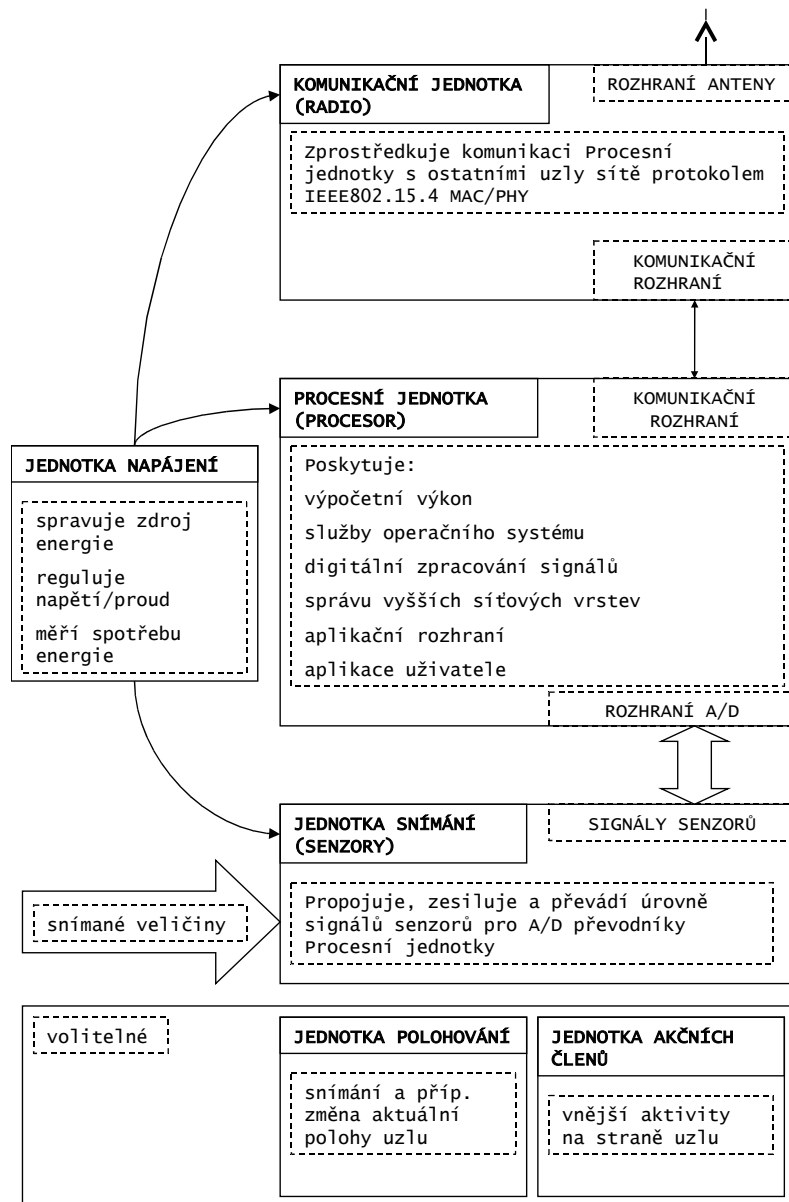
- ▷ snímače veličin, jejichž hodnoty měření je žádoucí distribuovat,
- ▷ radiokomunikační rozhraní pro spojení se sítí ostatních uzlů, předávání zpráv a přijímání instrukcí,
- ▷ řídicí systém, obvykle mikrokontrolér s operačním systémem, patřičně dimenzovaný pro danou aplikaci,
- ▷ alternativně výstupní rozhraní pro akční členy na straně uzlu,
- ▷ vlastní zdroj energie.

a optimalizovaných pro nízký příkon a dlouhodobý bezúdržbový provoz v řádu týdnů až let. Blokové schéma typického uzlu bezdrátové senzorické sítě z hlediska funkcionality je na obr. 2.1

Bezdrátové senzorické sítě mohou sestávat z mnoha (až stovek či tisíců) samostatných uzlů, vzájemně komunikujících prostřednictvím elektromagnetických vln v oblasti rádiových kmitočtů, obvykle ve vyhrazených pásmech UHF a SHF (300 až 3 000 MHz). Tyto uzly mohou mít předem zvolené určité statické anebo náhodné pohyblivé prostorové umístění.

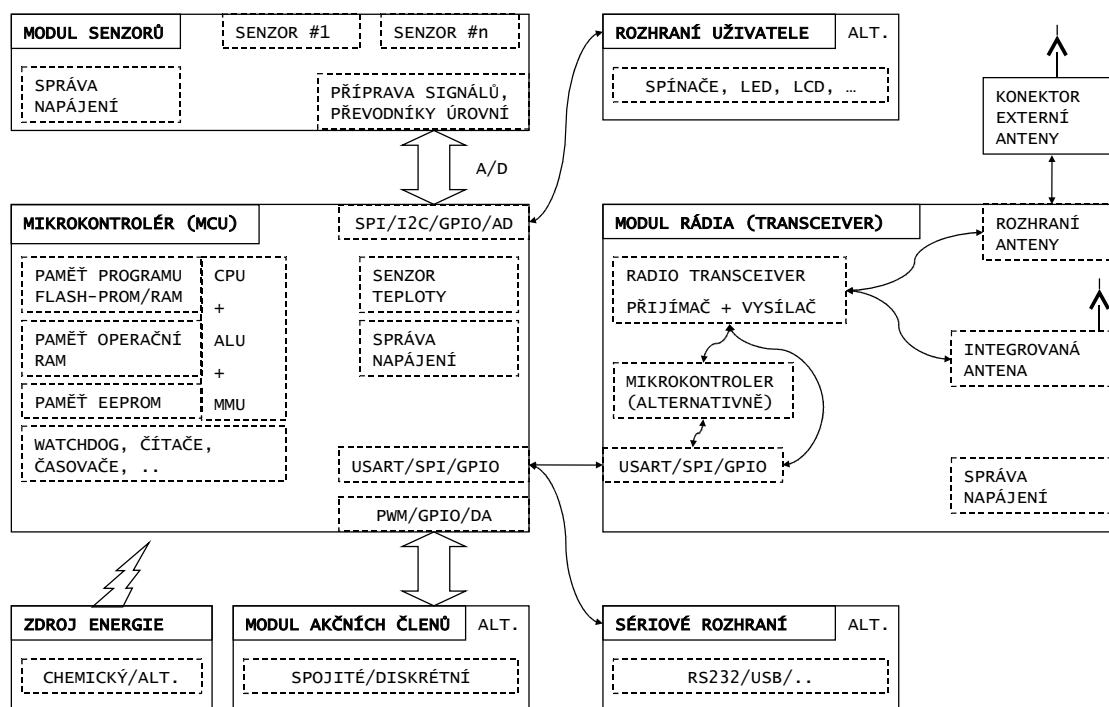
Propojení uzlů do sítě je nezbytné k předávání aktuálních dat v reálném čase, získaných monitorováním prostředí použitím snímačů, anebo také příjmu instrukcí k akčnímu zásahu na straně vzdáleného uzlu. Vlivem malých rozměrů a četnosti uzlů, jejich prostorové hustotě, mohou zajistit velmi detailní, spolehlivá a izolovaná měření (lokálně i galvanicky), jinými prostředky nedostupná.

Tyto podmínky také určují vlastnosti konstrukčních prvků pro aktivní komponenty bezdrátové senzorické sítě. Je zřejmé, že vývoj patřičně prostorově a ener-



Obrázek 2.1: Blokové funkční schéma typického uzlu bezdrátové senzorické sítě

## 2.1 Charakteristiky bezdrátových senzorických sítí



Obrázek 2.2: Blokové schéma typického technologického vybavení uzlu bezdrátové senzorické sítě

geticky úsporných prvků silně závisí na pokroku zejména v průmyslu polovodičů, mikrokontrolérů, integrovaných snímačů a efektivních zdrojů a akumulátorů energie.

Blokové schéma technologického vybavení uzlu bezdrátové senzorické sítě je na obr. 2.2

## 2.1 Charakteristiky bezdrátových senzorických sítí

Bezdrátové senzorické sítě se významně odlišují od ostatních sítí pro přenosy dat. Některé vlastnosti, např. rozsah a relativní hustotu uzlů, distribuovaný charakter a schopnost komunikovat v reálném čase, jsou podobné jako rozsáhlé datové sítě, avšak mnoho vlastností je unikátních. Kombinujeme zde charakteristiky rozsáhlých sítí s přísnými omezeními ve spotřebě energie a fyzikálních hranicích daných pro vestavné řídicí systémy.

Jedinečné charakteristiky a očekávané atributy bezdrátových senzorických sítí popisuje:

- ▷ mobilita jednotlivých uzlů a celé sítě,
- ▷ možnost velkého množství senzorů dislokovaných v rozsáhlém prostoru,
- ▷ možnost operací v nepřístupných, izolovaných a rizikových prostředích,
- ▷ součástí všech uzlů sítě je operační systém s možností běhu aplikací uživatele,
- ▷ dynamická dálková změna algoritmů, konfigurace uzlů a topologie sítě bez omezení funkčnosti,
- ▷ schopnost odolávat podmínkám prostředí,
- ▷ schopnost obnovit komunikaci po výpadku,
- ▷ schopnost pokrýt rozsáhlé prostory,
- ▷ schopnost provozu bez dohledu a údržby,
- ▷ stabilní kvalita snímaných dat,
- ▷ možnost adaptability při změně podmínek,
- ▷ dlouhá životnost a vysoká spolehlivost provozu.

Ve srovnání s tradičními pevnými a bezdrátovými sítěmi, senzorické sítě jsou specifické ve třídě ad-hoc sítí těmito odlišnostmi:

- ▷ prvky sítě jsou zaměřeny na data (datově-centrická), to znamená, že poskytují časově citlivá a precizní data v žádaném rozsahu na určené místo,
- ▷ prvky sítě jsou orientovány na aplikace; tradiční přenosové sítě slouží spíše univerzálně mnoha aplikacím pouhým přenosem dat, zatímco algoritmy instalované v uzlech sítě jsou zaměřeny na specifické úlohy, mohou data shromažďovat, zpracovat a lokálně na ně reagovat anebo data pouze odesílat do datového centra (centrálního uzlu).

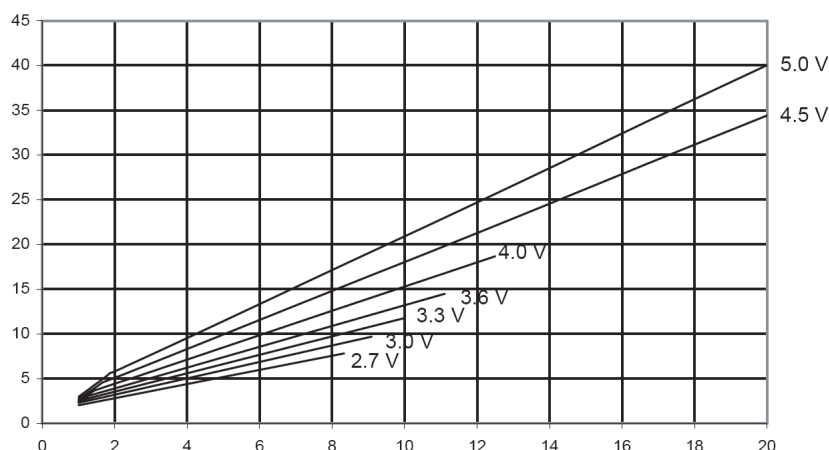
## 2.2 Výhody bezdrátových senzorických sítí a související omezení

Charakteristiky bezdrátových senzorických sítí zřetelně ukazují výhodné vlastnosti přinášející uživatelům.

Přednosti bezdrátových senzorických sítí působí specifická technologická omezení při návrhu a konstrukci síťových uzlů, například z hlediska zásob energie napájecího zdroje - obvykle chemického. Takové samostatně operující, na okolí nezávislé zařízení o fyzickém objemu v řádu jednotek kubických centimetrů může obsahovat pouze jeden energetický článek či malou baterii článků nesoucí náboj jen několik desítek či stovek Coulombů, solární článek anebo jiný energeticky limitovaný zdroj velmi malých rozměrů. Energetická nezávislost těchto uzlů může



## 2.2 Výhody bezdrátových senzorických sítí a související omezení



Obrázek 2.3: Závislost příkonu  $y$ : [mA] mikrokontroléru ATmega128 na systémovém kmitočtu  $x$ : [MHz] (převzato z dokumentace Atmel [27])

být předpokládána po celou dobu životního cyklu zařízení a to v řádu měsíců až let.

Technické vybavení uzlů sítě klade vysoké nároky na výběr energeticky velmi úsporných obvodů, mikrokontrolérů s potřebným početním výkonem, periferním vybavením a kapacitou pamětí. Energetická spotřeba polovodičových obvodů CMOS a moderních mikrokontrolérů roste téměř lineárně s výpočetním výkonem a frekvencí taktu (dobou instrukčního cyklu), obr. 2.3 ukazuje příklad této závislosti [27]. Hledáme proto při návrhu vhodný kompromis například mezi výpočetním výkonem, spotřebou, objemem pamětí, osazením vhodnými senzory a celkovými materiálovými a výrobními náklady.

Vlastnosti bezdrátového transportu dat prostřednictvím rádiových vln přinášejí výhody izolace jednotlivých přístrojů, ale současně jsou dalším omezujícím a kritickým prvkem. Závislost dosahu rádiového signálu na vzdálenosti vysílače a přijímače v daném prostředí je teoreticky kvadratická.

V provozu a při instalaci sítě je nutné najít optimální polohu obou uzlů pro dostatečně stabilní spojení s výkonovou rezervou a požadovanou maximální chybou a zároveň neplýtvat zásobami energie a kapacitou sítě retransmisemi při vysoké chybovosti doručování vlivem poddimenzované přenosové trasy.

V případě mobilních uzlů bezdrátové senzorické sítě je situace dále komplikovanější; síla signálu a kvalita spojení se rapidně mění se změnou polohy antén a stejně tak i hodnota parametrů bezdrátového spoje. Dochází tak ke ztrátám datových rámců a degradaci celkové kapacity doručování dat. Nalézt a předvídat optimální nastavení těchto nondeterministických dynamických sítí je netriviálním úkolem. Tyto problémy jsou stále předmětem intenzivního výzkumu a hledání nových metod pro správu komunikačních a síťových protokolů. S těmito restrikcemi je nutné počítat již při návrhu a konstrukci vlastních prvků i celé sítě.

## 2.3 Oblasti použití senzorických sítí

Oblastí aplikací bezdrátových senzorických sítí je v dnešní době již mnoho a jsou různorodá, typickými aplikacemi jsou monitorování, sledování změn, pohybu a dálková správa a řízení. Obvyklým způsobem jsou uzly rozmístěny v oblasti zájmu, kde snímají měřené veličiny a poskytují je prostřednictvím sítě hlavnímu uzlu (administraci sítě) [1].

## 2.4 Funkční vlastnosti BSS

Jednotlivé uzly sítě mohou obecně plnit tyto funkce:

- ▷ snímání a kolekce měřených dat,
- ▷ šíření a předávání dat,
- ▷ vyhodnocování a ukládání snímaných či předávaných dat,
- ▷ služby na úrovni rádiové a síťové komunikace,
- ▷ akční zásah na žádost či reakci na události,
- ▷ automatické servisní služby.

## 2.5 Třídy platforem BSS

Platformou rozumíme technologické řešení prvků systému, jenž jsou v dané systémové úrovni slučitelné. Z hlediska nároků na jednotlivé uzly, výkon a strukturu bezdrátové senzorické sítě lze rozlišit následující třídy platforem:

- ▷ univerzální - umožňující připojení rozmanitých typů senzorů a rozhraní,
- ▷ specializované - bez možností rozšíření a modifikace funkcionality, levné, spolehlivé,
- ▷ výkonné - poskytující vysoký početní výkon a velkou šířku pásma přenášených dat pro náročné aplikace s přenosem velkého toku dat v reálném čase a lokálním zpracováním dat,
- ▷ rozhraní brány mezi sítí senzorů a jinými sítěmi či databázemi - kolektory dat a připojení k LAN, WAN, WLAN.

Přehled možných typů platforem shrnuje Tab. 2.1

Tabulka 2.1: Třídy platform uzlů bezdrátové senzorické sítě

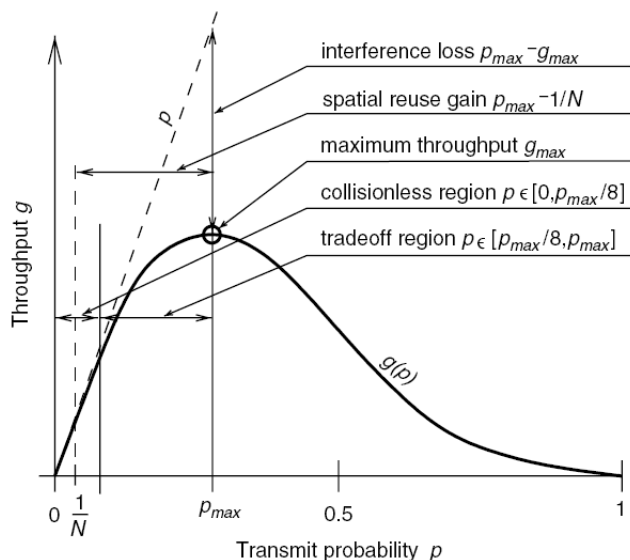
TŘÍDA PLATFORMY	FYZICKÝ OBJEM [cm <sup>3</sup> ]	TYPICKÁ APLIKACE	TYP. CYKLUS AKTIVNÍ [%]	PŘÍKON AKTIVNÍ (řádově, max.)	PŘÍKON ÚSPORNÝ	MIPS FLASH RAM [kB]	RYCHLOST (max.) [kb/s]
MINIMÁLNÍ PLATFORMA	< 1	specializované aplikace pro detekci, dohled a dálkové ovládání	0,01 - 1	< 3V < 20mA 60mW	< 2V < 1μA	< 5 < 64 < 4	< 50
UNIVERZÁLNÍ PLATFORMA	1 - 10	široké možnosti aplikačních použití  variabilita změnou software	1 - 2	3V < 30mA 100mW	3V < 20μA	< 20 < 256 < 64	< 100
VYSOKO- RYCHLOSTNÍ PLATFORMA	10 - 100	robotika, mechatronika  rychlá dostupnost větších objemů dat	5 - 10	5V < 500mA 2W	3V < 100μA	> 20 < 1000 < 128	> 100
BRÁNA	> 100	centrální agregační uzel  brána do jiných sítí	0 - 100	5V 500mA 10W	nepodstatný	> 20 < 1000 < 128	>> 100

## 2.6 Návrh sítí senzorů

Obecný návrh bezdrátové sítě vychází z určitých předpokladů, omezení daných technických vybavení a jednotlivých prvků sítě. Zaměříme se na sítě charakteristické nestabilním přenosovým kanálem.

Síť můžeme charakterizovat těmito metrikami:

- ▷ topologie - vzájemná poloha jednotlivých uzlů ovlivňuje rozsah sítě, kapacitu, propustnost,
- ▷ rozhraní - transportní kapacita uzlů (datových bran uzlů),
- ▷ latence - reakce (odezva) sítě na podnět, pro některé aplikace je podstatná odezva sítě na požadavek nebo doručení dat v omezeném časovém intervalu (nastavení serva, reakce na událost),
- ▷ propustnost - míra objemu dat dodávaných sítí. V paketové síti to může být očekávaný počet úspěšných transmisí daného uzlu za časovou jednotku. Celková kapacita uzlu omezuje kapacitu celé sítě, např. v uzlech s velkou agregací dat v úrovni kořene stromu,
- ▷ rozsah sítě - je zpravidla omezen technologickým vybavením, topologií, dosahem radiového signálu při potřebné spolehlivosti,
- ▷ energetická účinnost - snaha o minimální energetický příkon,



Obrázek 2.4: Závislost propustnosti na pravděpodobnosti odesílání pro MAC s náhodným přístupem k médiu

- ▷ tolerance lokální poruchy - lze zvýšit redundancí nebo kalibrací uzlů,
- ▷ transportní kapacita - suma kapacit na jednotku vzdálenosti dle níž se odvozuje výkon sítě.

Typická závislost propustnosti pro obecný MAC protokol s náhodným přístupem a všechny uzly v dosahu je na obr. 2.4, [49]. Z této závislosti lze získat tyto závěry:

- ▷ pro malá  $p$  je propustnost rovna  $p$  (malý počet kolizí a závislost  $g(p)$  je téměř lineární),
- ▷ tam kde je ztráta paketů meší než 10% nazýváme oblastí bez kolizí (0 až  $p/8$ ),
- ▷  $< p/8 ; p_{max} >$  je interval, kde dochází ke zvýšení počtu retransmisí,
- ▷ v malých sítích kde všechny uzly interferují, dochází k totální ztrátě - degradaci, rozdíl  $p - g(p)$  je interferenční ztrátou.

Analyticky bylo zjištěno, že teoretický horní limit propustnosti jednoho uzlu v ad-hoc síti o  $n$  uzlech je asymptoticky omezen vztahem

$$\Theta\left(\frac{W}{\sqrt{n}}\right) [b/s]$$

kde  $W$  je šířka pásma sdíleného kanálu. [39]. Teoreticky dosažitelná kapacita uzlu statické náhodné ad-hoc sítě s ideálním globálním časováním a směrováním je odhadována na

$$\Theta\left(\frac{W}{\sqrt{n \log n}}\right) [b/s].$$

Z uvedeného vyplývá, že velikost ad hoc sítí je nutné stanovit optimálně a udržovat v nutné minimální topologii vzhledem k požadované propustnosti. Experimentální výsledky ukazují [38], že propustnost sítě s náhodným přístupem klesá s koeficientem

$$C/n^{1,68},$$

kde  $C$  je konstanta daná prostředím a  $n$  je počet aktivních uzlů sítě.



## 3 Standard IEEE® 802.15.4

Předmětem standardu IEEE®802.15.4 je definice doporučení pro rádiové bezdrátové sítě osobního dosahu (LR-WPAN, Local Range - Wireless Personal Area Network) používající ke komunikaci bezlicenční kmitočtová pásma (ISM, Industrial Scientific Medical).

Hlavními znaky LR-WPAN jsou nízká spotřeba energie, nízké pořizovací náklady, snadná instalace, komunikace krátkého dosahu, spolehlivost a dlouhodobý provoz bez údržby.

Cílem standardu je poskytnout doporučení pro technologii vhodnou k nasazení tam, kde se soudobé středněrychlostní a vysokorychlostní protokoly jeví jako nadměrně dimenzované, příliš nákladné a náročné na hardwarové prostředky a spotřebu energie.

Architekturu tvoří dvě vrstvy, fyzická PHY a na ni navazující vrstva přístupu k médiu MAC. Bezlicenční kmitočtová pásma 915 MHz, 2,4 GHz a 868 MHz dovolují globální provoz sítě i s ohledem na omezení místních telekomunikačních předpisů. Data jsou modulována pseudonáhodnou sekvencí rozprostřeného spektra (Direct-Sequence Spread Spectrum, DSSS) použitím binární fázové modulace (Binary Phase-Shift Keying, BPSK) ve frekvenčních pásmech 868 MHz a 915 MHz rychlostmi 20 kb/s, resp. 40 kb/s. V pásmu 2 400 až 2 484 MHz je použita ofsetová kvadrurní fázová modulace (Offset Quadrature Phase-Shift Keying, O-QPSK) a modulační bitová rychlost 250 kb/s. [40]

### 3.1 Standard IEEE® 802.15.4 v pásmu 2,4 GHz

Důležitými charakteristikami definic standardu v pásmu 2,4 GHz jsou:

- ▷ síťové topologie hvězda a Peer-to-Peer,
- ▷ modulační bitová rychlost 250 kb/s,
- ▷ 16 a 64 bitů pro adresování uzlů,
- ▷ potvrzování datových rámců pro zvýšení spolehlivosti,
- ▷ CSMA-CA metoda přístupu k médiu,
- ▷ 16 rádiových kanálů se separací po 5MHz, šířka kanálu 2MHz,
- ▷ měření energie v rádiovém kanále (ED),

- ▷ metrika LQI, indikátor kvality spoje,
- ▷ citlivost přijímače min. -85 dBm pro S/N = 10 dB.

Architektura IEEE®802.15.4 je definována ve vrstvách dle doporučení OSI (ISO/IEC 7498-1:1994). Každé LR-WPAN zařízení musí implementovat fyzickou vrstvu PHY pro řízení rádiového rozhraní a MAC vrstvu pro obsluhu přístupu k PHY a síti všemi typy přenosů. Tak lze zajistit kompatibilitu na této úrovni přístupu k médiu modemů různých výrobců.

## 3.2 Vybrané definice standardu IEEE® 802.15.4

### 3.2.1 Definice zařízení standardu IEEE® 802.15.4

V sítích dle IEEE®802.15.4 mohou operovat dva typy zařízení:

- ▷ zařízení s omezenou funkcionalitou (RFD),
- ▷ zařízení s plnou funkcionalitou (FFD).

Zařízení s plnou funkcionalitou (FFD) mohou operovat v módech:

- ▷ PAN koordinátor,
- ▷ koordinátor,
- ▷ koncové zařízení.

Zařízení FFD může komunikovat s RFD a ostatními FFD, zatímco RFD může komunikovat pouze s FFD.

### 3.2.2 Síťové topologie standardu IEEE® 802.15.4

Síť LR-WPAN dle IEEE®802.15.4 může být organizována v jedné ze dvou topologií, síť typu hvězda nebo Peer-to-Peer (P2P).

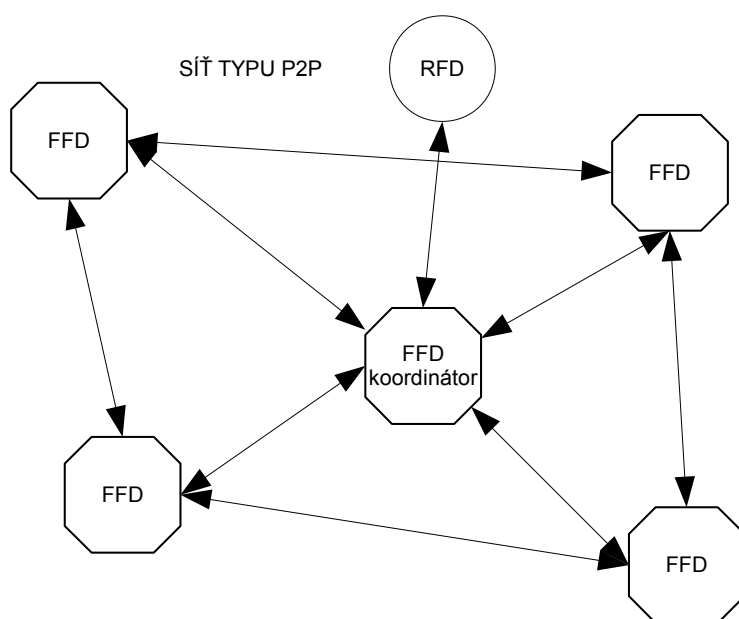
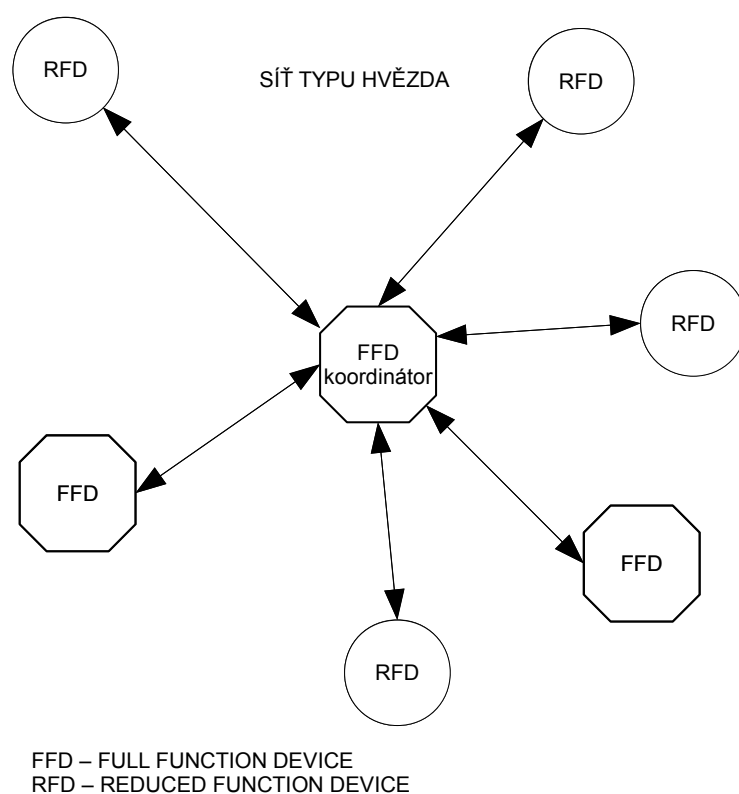
Obr. 3.1 názorně ukazuje jejich strukturu.

#### Struktura topologie typu hvězda (Star network)

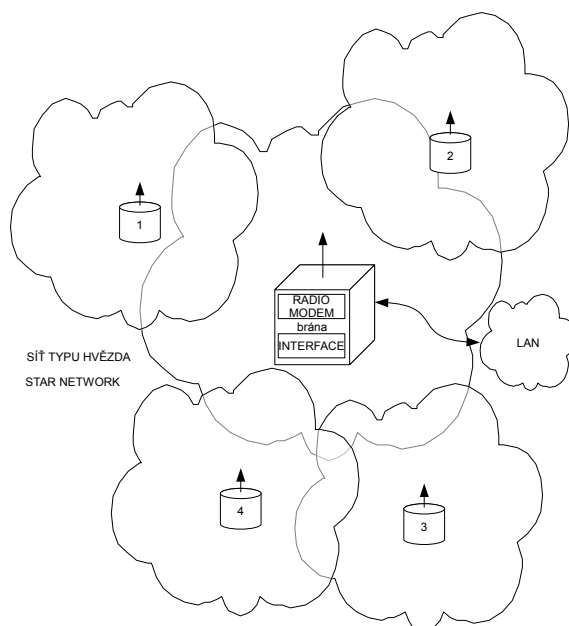
Topologie typu hvězda má jeden centrální uzel s nímž komunikují uzly koncové. Centrální uzel se nazývá koordinátor a řídí komunikaci s ostatními koncovými uzly. Koncové uzly mohou komunikovat pouze s koordinátorem, nikoli přímo navzájem. Topologie typu hvězda je výhodná v aplikacích, kde se struktura sítě nemění a aplikace vyžaduje stabilní provoz s extrémně nízkým příkonem, například v domácí automatizaci, obsluze periférií a medicíně.

Příklad zobrazení sítě typu hvězda je na obr. 3.2.





Obrázek 3.1: Toplogie definované standardem IEEE802.15.4



Obrázek 3.2: Topologie sítě typu hvězda

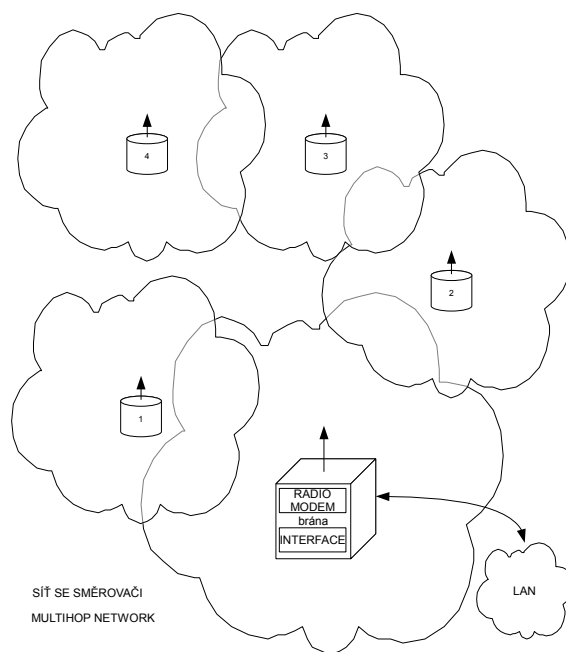
### Formování topologie sítě typu hvězda

Aktivací FFD se stává koordinátorem sítě a může zahájit komunikaci v síti na správcem zvoleném komunikačním kanále. Všechny sítě typu hvězda operují nezávisle na ostatních sítích. Toho se dosahuje volbou odlišného identifikátoru PAN sítě, který je jedinečný pro každou síť. Ostatní uzly FFD a RFD se mohou připojovat do sítě s totožným identifikátorem PAN.

### Struktura topologie typu Peer-to-peer

Peer-to-Peer topologie umožňuje mnohem komplexnější síťové formace (mesh), definuje také koordinátora sítě, ale každý uzel může komunikovat s každým jiným uzlem v dosahu bezdrátového rozhraní a to i směrováním dat skoky (multihop) přes více uzlů (definice linkové vrstvy již není součástí IEEE®802.15.4, závisí na vyšších vrstvách). Peer-to-Peer síť může mít schopnosti automatické formace a obnovitelnosti při přerušení spojení a uplatní se ve velkém množství dynamických aplikačních oblastí, zejména průmyslovém řízení a monitorování, bezpečnostních službách, řízení mobilních objektů a robotice.

Schéma sítě s vyšší síťovou vrstvou (s předáváním, případně se směrováním datagramů) nad vrstvou MAC je schopna přenášet data přes více uzlů jak ukazuje obr. 3.3. Každý uzel tedy musí být schopen pracovat jako relais anebo směrovač.



Obrázek 3.3: Topologie sítě s možností multi-hop, P2P

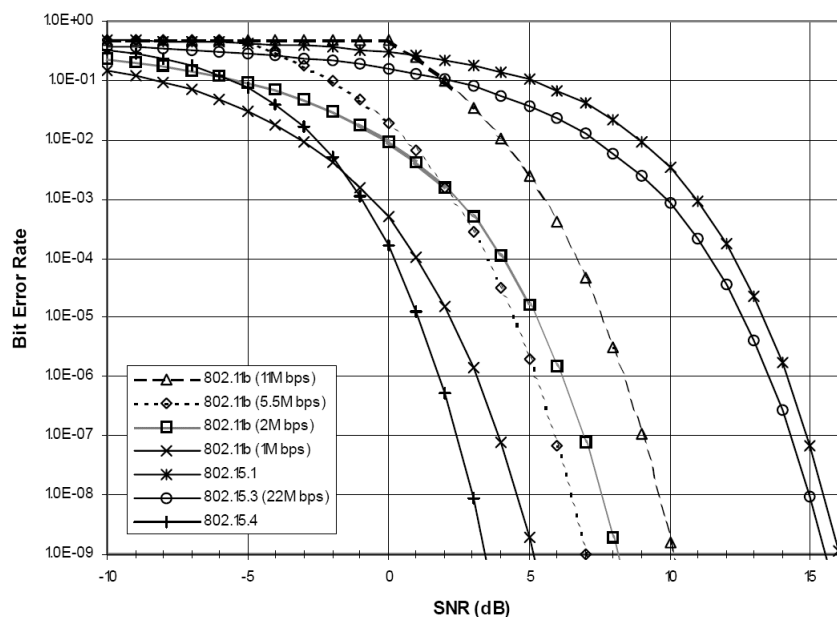
### Formování topologie sítě typu Peer-to-Peer

V sítích typu Peer-to-Peer má každý uzel schopnost komunikovat se všemi ostatními uzly v dosahu bezdrátového rozhraní. Vyšší síťové a aplikační vrstvy musí zajistit algoritmy pro identifikaci uzlů, sestavování sítě, směrování a údržbu topologie. Jedno zařízení či uzel je nominován jako koordinátor, může to být první zařízení aktivované na zvoleném rádiovém kanálu. Struktura sítě se dále formuje topologicky nebo geograficky a je možné zavést restriktce formování této sítě. Jednou z možností Peer-to-Peer topologie je struktura typu strom nebo strom shluků (cluster tree). Struktura typu strom je zvláštním případem Peer-to-Peer sítě, kde většina uzlů jsou FFD, RFD se připojují jako listy stromu, protože RFD neumožňují připojení dalších uzlů. Každý FFD může poskytovat připojení ostatním FFD koordinátorům nebo RFD. Pouze jeden z těchto koordinátorů bude hlavním (kořenovým) PAN koordinátorem a zpravidla bývá lépe vybaven energetickými a početními zdroji než ostatní uzly. Nejjednodušší formou sítě typu strom je jednoduchý strom, větší síť lze formovat spojováním stromů do shluků nebo až do formy cyklického či úplného grafu (sítě typu mřížka, Mesh).

### 3.2.3 Definice fyzické vrstvy PHY standardu IEEE®802.15.4

Fyzická vrstva PHY standardu IEEE®802.15.4 plní tyto funkce:

- ▷ volba a nastavení kmitočtu rádiového kanálu,



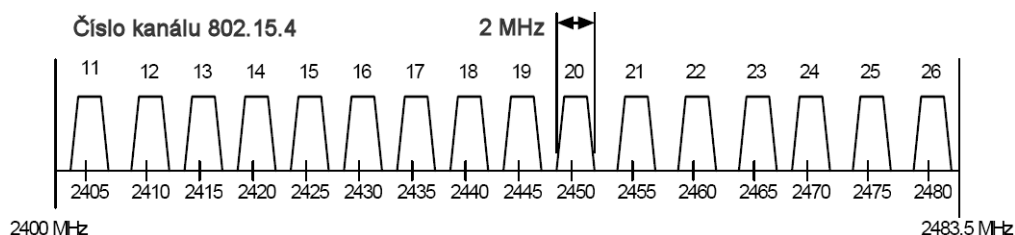
Obrázek 3.4: Závislost bitové chybovosti (BER) na poměru signálu k šumu (SNR) různých modulačních standardů.

- ▷ aktivaci a deaktivaci rádiového subsystému,
- ▷ příjem a vysílání datových rámců,
- ▷ měření energie v rádiovém kanále (ED),
- ▷ metrika LQI, indikátor kvality spoje,
- ▷ zjišťování volného kanálu (Clear channel assessment, CCA) pro CSMA-CA.

Implementace fyzické vrstvy v pásmu 2,4 GHz používá kvazi-orthogonální kvadrurní modulační schéma. Každý symbol (4 bity) je reprezentován jednou ze šestnácti téměř orthogonálních pseudonáhodných sekvencí délky 32 bitů. Toto je výkonově účinná metoda dosahující výtečných poměrů signálu k šumu (SNR) a signálu k interferenci (SIR) za cenu potřebného širšího pásma než by bylo nutné k přenosu symbolů (62,5 kb/s) bez rozprostření. Tento typ modulace přináší především benefit v lepší odolnosti vůči rušení úzkopásmovou i širokopásmovou interferencí vlivem procesního zisku korelační demodulací signálu DSSS. Dosahuje se chybovosti paketů (PER) pod 1% při odstupu signálu od šumu (SNR) pouhých 5dB. Závislost bitové chybovosti (BER) na poměru signálu k šumu (SNR) v porovnání různých modulačních standardů ukazuje obr. 3.4 (převzato z textu Standardu IEEE802.15.4).

### Indikátory ED and LQI

IEEE®802.15.4 PHY definuje funkce měření kvality spojení a úrovně interference v rádiovém kanálu. Příjímač podává na žádost report o detekci energie (ED), což



Obrázek 3.5: Kmitočty komunikačních rádiových kanálů (zdroj [40])

je odhad o velikosti úrovně detekovaného signálu bez demodulace a je součástí algoritmu výběru volného komunikačního rádiového kanálu. Metrika LQI vrací hodnotu měření úrovně výkonu a SNR na vstupu přijímače pro každý přijatý paket. Hodnocením kombinace těchto dvou hodnot lze zjistit zda byl datový rámec poškozen interferencí nebo nízkou úrovní signálu.

### 3.2.4 Alokace frekvencí v pásmu ISM 2,4 GHz

Kmitočty komunikačních rádiových kanálů dle standardu IEEE®802.15.4 a standardu IEEE®802.11 jsou na obr.3.5

Přiřazení čísla kanálu a frekvenci středu kanálu (nosného kmitočtu) je definována tímto vztahem

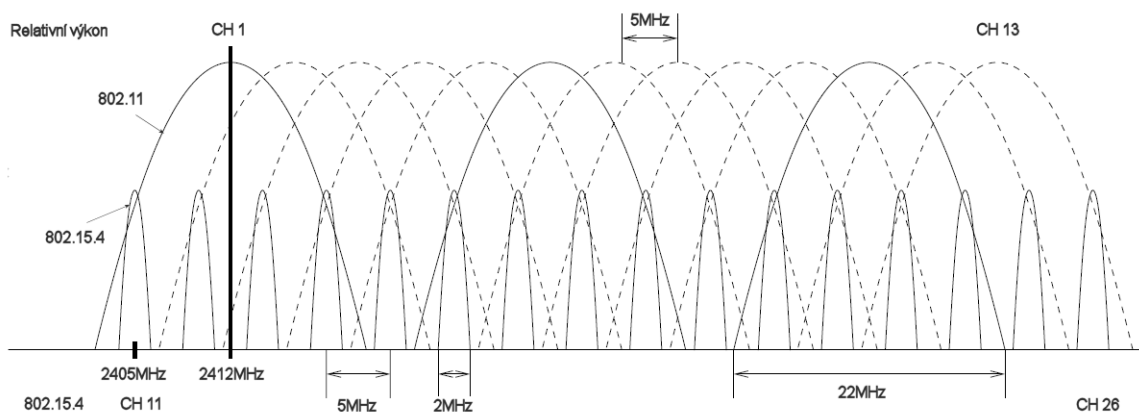
$$f = 2405 + 5(k - 11) \text{ [MHz]}, \text{ pro } k = 11 \dots 26$$

### Model útlumu přenosové trasy

Pro potřeby metodiky měření a porovnávání síly signálu na poloze komunikujících uzlů se zavádí model útlumu přenosové trasy. Funkce závislosti útlumu přenosové trasy na vzdálenosti má dva segmenty, jeden do vzdálenosti 8 m s exponentem 2 (šíření ve volném prostoru) a druhý nad 8 m s exponentem 3,3 (šíření s odrazy). Funkce je definována takto:

$$P(d) = 40.2 + 20 \log(d) \quad \text{pro } d \leq 8 \text{ m}$$

$$P(d) = 58.5 + 33 \log(d/8) \quad \text{pro } d > 8 \text{ m}$$



Obrázek 3.6: Alokace kmitočtového pásma ISM 2,5 GHz

### 3.2.5 Koexistence v kmitočtovém pásmu ISM 2,4 GHz

Kmitočtové pásmo ISM 2,4 GHz je alokováno a využíváno mnoha zařízeními k různým účelům s použitím odlišných standardů a modulací. Patrně nejvíce kolizemi dotčenými technologiemi jsou síť WLAN, WiMax, Bluetooth a WPAN. Jde zejména o sérii standardů IEEE 802.11a/b/g/n, IEEE 802.16 a IEEE 802.15.4. Standard IEEE 802.15.4 poskytuje několik metod k harmonizaci koexistence s ostatními bezdrátovými zařízeními v daném kmitočtovém pásmu.

Tyto metody buď potlačují nepříznivé vlivy nebo lépe odolávají interferencím:

- ▷ druh modulace signálu, DSSS,
- ▷ nízký výkon vysílače,
- ▷ dynamická volba kmitočtu,
- ▷ detekce obsazení kanálu (Clear channel assessment, CCA),
- ▷ vyhodnocování energie kanálu ED a metriky kvality spojení LQI.

Porovnání alokace jednotlivých komunikačních kanálů v kmitočtovém pásmu ISM 2,5 GHz sítěmi IEEE802.11 a IEEE802.15.4 ukazuje obr. 3.6

### 3.2.6 Definice vrstvy MAC

Vrstva MAC poskytuje dvě služby: datovou službu a službu správy přístupu. Datová služba zajišťuje příjem a vysílání datových jednotek MAC (MPDU) přes služby PHY vrstvy. Služby poskytované vrstvou MAC jsou:

- ▷ přihlašování k síti (asociace),
- ▷ odhlašování ze sítě,
- ▷ validace datových rámců,

- ▷ potvrzování datových rámců,
- ▷ přístup k médiu přes PHY,
- ▷ správa majáku.

#### Struktura rámců MAC

Struktura rámců MAC je navržena pro robustní přenos dat nespolehlivým transportním médiem při nízké složitosti datové struktury. Standard definuje čtyři typy rámců:

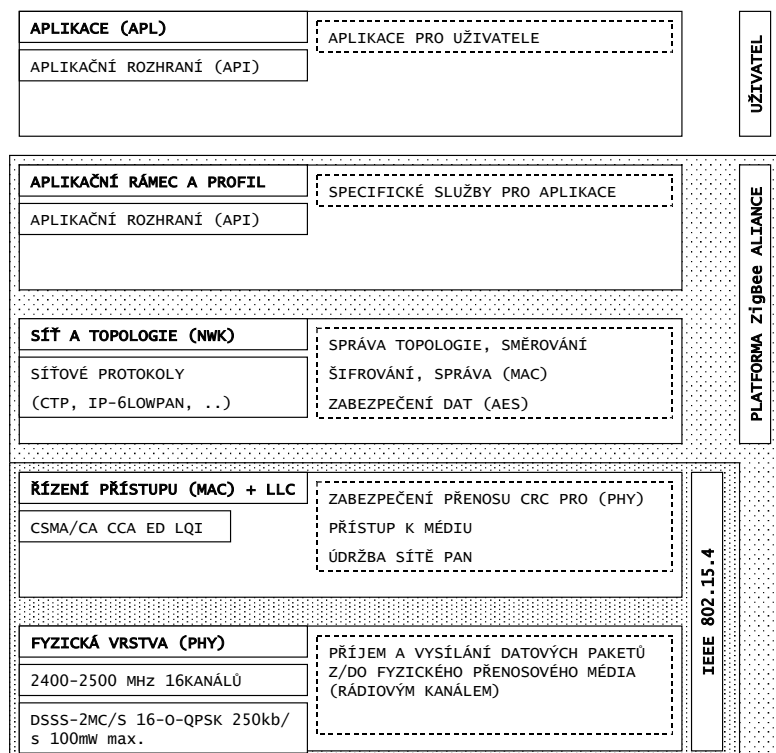
- ▷ rámec majáku, užívaný koordinátorem pro vysílání majáku,
- ▷ datový rámec pro všechny přenosy dat,
- ▷ rámec potvrzení úspěšného příjmu,
- ▷ rámec příkazů MAC.

#### 3.2.7 Vrstvy nadřazené MAC IEEE802.15.4

Struktura síťových vrstev dle doporučení OSI/ISO pro IEEE802.15.4 je na obr. 3.7. Standard IEEE802.15.4 definuje nejnižší dvě: fyzickou vrstvu PHY a vrstvu přístupu k médiu MAC. Vyšší vrstvy implementují výrobci modemů dle vlastních potřeb, příkladem je ZigBee síťový a aplikační protokol [7].

#### 3.2.8 Mechanismus CSMA-CA v sítích PAN

IEEE®802.15.4 PHY definuje dva typy přístupu k rádiovému kanálu v závislosti na konfiguraci sítě. PAN bez majáku (Nonbeacon PAN) používají tzv. nedělený CSMA-CA (unslotted CSMA-CA) algoritmus. Jestliže je třeba vysílat data nebo MAC příkaz, před každým zapnutím vysílače PHY čeká náhodně zvolený časový interval. Je-li po uplynutí této doby detekována nízká úroveň na výstupu přijímače, kanál se považuje za volný a PHY odešle data. Je-li po uplynutí této doby detekována na výstupu přijímače úroveň vyšší než stanovený limit, kanál se považuje za obsazený a PHY opět čeká náhodně zvolený časový interval. PAN s majákem (Beacon enabled PAN) používají tzv. dělený CSMA-CA (slotted CSMA-CA) algoritmus podobně jako PAN bez majáku, ale časování intervalů čekání jsou synchronizována s časováním majáku koordinátora. Potvrzovací a majákové rámce jsou vysílány bez použití CSMA-CA.



Obrázek 3.7: Vrstvy dle OSI/ISO pro IEEE802.15.4

### 3.2.9 Metody pro zvýšení spolehlivosti přenosu

#### Potvrzování rámců

Úspěšné doručení a validace datového nebo příkazového MAC rámce může být volitelně potvrzováno jak popisuje kapitola 7.5.6.4. standardu. Není-li adresát schopen přijatý rámec zpracovat (vlivem interference, chyby), potvrzení nevydá. Jestliže odesílatel potvrzení nepřijme v určitém termínu, považuje přenos za neúspěšný a vysílání několikrát opakuje (standardně třikrát), dokud potvrzení nepřijme. Není-li potvrzování požadováno, odesílatel hodnotí přenos jako úspěšný.

#### Verifikace dat datových rámců

Pro detekci chyb přenosu standard aplikuje FCS mechanismus kontrolou 16-bitové CRC kontroly pro každý datový rámec.

## 3.3 Šíření elektromagnetických vln v pásmu 2,4 GHz

Vlastnosti elektromagnetického pole jako přenosového média pro komunikační kanál v pásmu decimetrových až centimetrových rádiových vln vnáší fundamen-



tální charakteristiky pro bezdrátové komunikační systémy. Prostor mezi vysílačem a přijímačem může vykazovat rozmanité fyzikální vlastnosti.

Mohou se projevit například tyto způsoby šíření signálu:

- ▷ přímé šíření prázdným prostorem, reálné pouze v kosmickém prostoru,
- ▷ šíření prostorem bez překážek, nazývané také jako spojení s přímou viditelností,
- ▷ šíření prostorem s překážkami, nazývané také jako spojení bez přímé viditelnosti,
- ▷ šíření ohybem na překážkách a odrazem od překážek o velikosti srovnatelné s vlnovou délkou,
- ▷ kombinace uvedených vlastností šíření.

Narozdíl od spojů pevně instalovaných (metalických, optických), jejichž vlastnosti jsou téměř neměnné a předvídatelné, takzvané bezdrátové rádiové spoje podléhají mnoha nejistým faktorům vnášejícím mnoho proměnných a náhodných jevů, analyticky obtížně identifikovatelných a předvídatelných.

Jedná se zejména o nelineární ztrátu energie signálu šířením prostorem, útlum signálu absorpcí a rozptylem, mnohacestné šíření a interference, Rayleighův únik signálu apod. Typická závislost útlumu elektromagnetického pole na vzdálenosti antén v nehomogenním prostředí v pásmu ISM 2,5 GHz je na obr. 3.8.

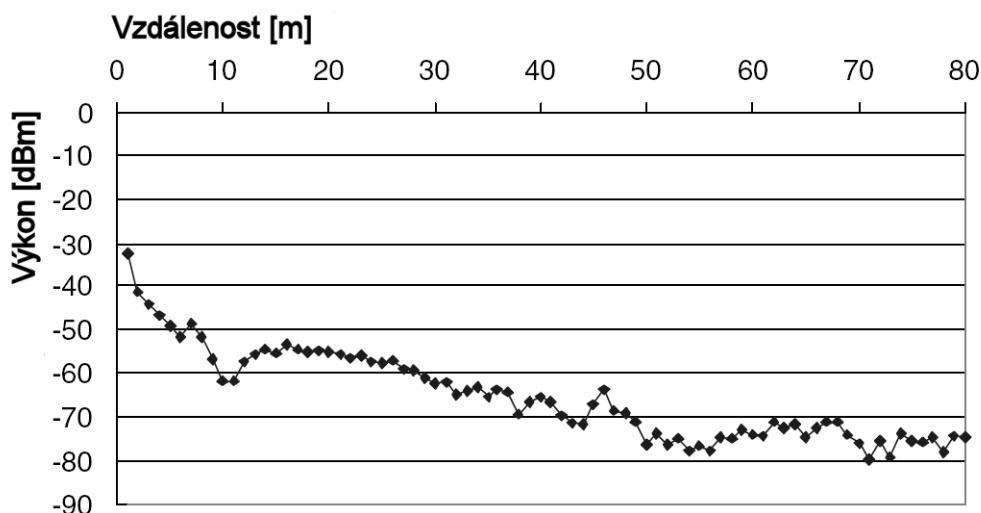
Pásmo ISM 2 400 – 2 483,5 MHz je v současné době velmi intenzivně využíváno. Na základě všeobecných oprávnění VO-R / 12 / 08.2005-34 a VO-R / 10 / 03.2007-4 toto pásmo sdílejí aplikace bezdrátových sítí včetně bezdrátového přenosu Internetu (RLAN, WLAN – standardy IEEE® 802.11b / g / a / n), zařízení Bluetooth® a některé další aplikace (bezdrátové kamery, železniční aplikace, RFID, atd.) a lze tedy s vysokou pravděpodobností očekávat i rušení a interference mezi zařízeními různých standardů.

#### 3.3.1 Charakteristika síly signálu

Sílu signálu definujeme jako hodnotu vysokofrekvenčního výkonu v daném místě prostoru, zachyceného anténou a přivedeného na vstupní obvod přijímače. Tuto hodnotu uvádíme buď obecně jako hodnotu síly pole ve V/m při výpočtech, nebo při měření na anténách a vysokofrekvenčních obvodech obvykle v relativní hodnotě vůči vztažné hodnotě výkonu (obvykle 1 mW) v poměrných jednotkách dB. Vztah pro převod absolutní hodnoty výkonu na relativní hodnotu zní

$$P_{dBm} = 10 \log P_{abs} \quad [dBm; mW],$$

kde  $P_{dBm}$  je relativní hodnota výkonu,  $P_{abs}$  je absolutní hodnota výkonu. Například citlivost přijímače modulů XBee® je podle údajů výrobce -92 dBm, tzn. o 92



Obrázek 3.8: Typická závislost síly elektromagnetického pole [dBm] na vzdálenosti antén [m] v nehomogenním prostředí

dB méně než 1 mW, v absolutní hodnotě tedy výkon 0,63 pW na vstupu přijímače. Hodnotu výkonu můžeme také převést na napětí na známé hodnotě impedance vstupních obvodů přijímače, například v  $\mu\text{V}$  na běžné hodnotě impedance  $50\ \Omega$ .

Hodnotu napětí z hodnoty výkonu na známé impedanci vypočítáme dle Ohmova zákona ze vztahu

$$U = \sqrt{P_{abs}Z} \quad [V; W; \Omega],$$

kde  $U$  je napětí,  $P_{abs}$  je hodnota výkonu,  $Z$  je impedance. Pro ilustraci: v případě citlivosti přijímače modulů XBee® dostáváme pro výkon -92 dBm a impedanci  $50\ \Omega$  napětí 5,6  $\mu\text{V}$  na vstupu přijímače.

### 3.3.2 Závislosti změny síly signálu

Závislosti změn síly signálu na změně polohy antény umístěné v elektromagnetickém poli v nehomogenním prostředí s neznámými vlastnostmi jsou velice komplexní a analyticky exaktně obtížně zjistitelné. Nejjednodušší situace je ve volném prostoru, kde výkon na přijímací anténě klesá teoreticky se čtvercem vzdálenosti od vysílače. Tento vztah popisuje rovnice Friisova [45]:

$$P_p = P_v \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 [W; W; m; m]$$

kde  $P_p$  je výkon generovaný vnějším polem na přijímací anténě,  $P_v$  vyzářený výkon vysílací anténou,  $\lambda$  vlnová délka a  $d$  je vzdálenost mezi anténami.

V praxi je situace obvykle složitější, neboť je obtížné průběh útlumu a způsob šíření signálu předvídat, neznáme-li detailně vlastnosti a tvar prostředí, jímž se signál šíří.

## 3.4 Antény

Antény používané a schválené výrobci modulů a zařízení ZigBee a IEEE802.15.4 jsou konstruovány převážně jako:

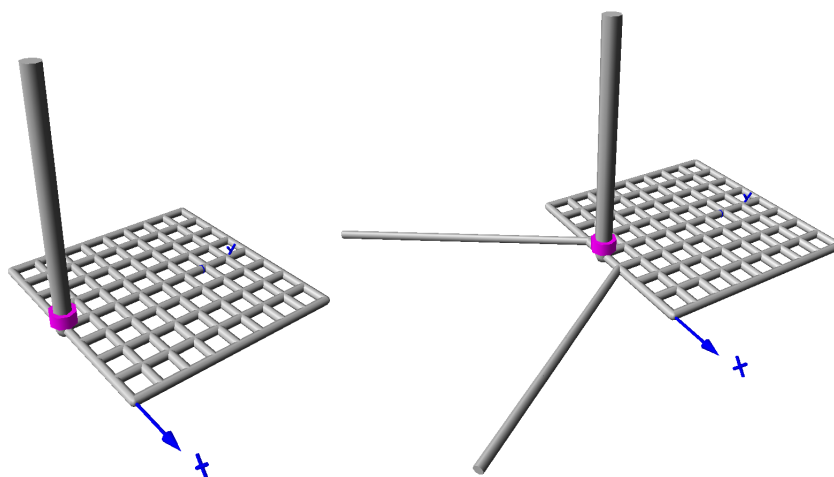
- ▷ asymetricky napájené vertikální dipóly (unipóly) s umělou zemní rovinou (tzv. groundplane anténa) a všesměrovou vyzařovací charakteristikou v horizontální rovině s teoretickým maximem 2,15 dB vůči isotropnímu zářiči [48],
- ▷ mikropáskové antény s typickou vyzařovací charakteristikou blízkou vyzařování dipólu [45],
- ▷ směrové anténní řady a soustavy pro speciální směrové spoje či lokalizaci.

Při volbě vhodné antény pro aplikaci bezdrátové senzorické sítě je nutné mít na zřeteli regulační podmínky v zemi použití. U antén s vyšším ziskem je nutné patřičně snížit výstupní výkon vysílače tak, aby nebyly překročeny hodnoty nejvyššího povoleného vyzářeného výkonu. O těchto regulacích pojednává následující podkapitola.

V mobilních aplikacích hraje velkou roli únik signálu (kolísání hodnoty přijímaného signálu na poloze) s ostrými a výraznými minimy hodnoty, způsobující výpadky spojení i v oblastech s průměrnou vysokou hodnotou signálu.

Účinnost antény je jedním z důležitých parametrů v souvislosti s kvalitou rádiového spojení. Antény v pásmu decimetrových vln a mikrovln lze konstruovat velmi účinné a kompaktní vzhledem k jejich rozměrům a vlnové délce. Moduly XBee® dodává výrobce s integrovanými anténami typu Whip (prut) nebo Patch (ploška) a doporučuje některá další řešení externě připojených antén. Podle charakteru bezdrátové senzorické sítě a její topologie můžeme volbou typu antény mnohonásobně zvětšit rozsah pokrytí sítě signálem. Obecně lze stanovit tato doporučení pro:

- ▷ statické topologie, pro sítě typu hvězda a strom lze výhodně využít částečně směrových antén ve směrech, kde potřebujeme větší dosah,
- ▷ mobilní topologie je situace složitější, neboť změnou polohy uzlů se výrazně mění úroveň ve všech bodech prostoru. Je-li prostor omezen, lze použít částečně směrových antén se ziskem v daném směru (vertikální dipól, unipól s reflektorem).



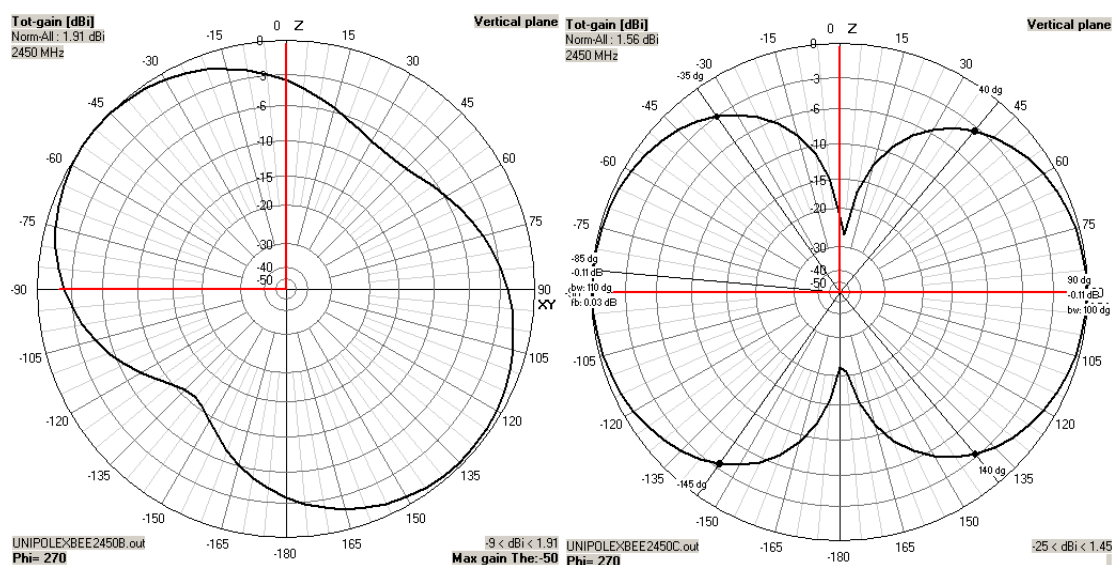
Obrázek 3.9: Modely antén modulu XBee, vlevo originální, vpravo s úpravou

Měřením síly signálu při komunikaci modulů XBee® jsem zjistil značné rozdíly mezi signály generovanými anténou typu Patch a Whip. Rozdíl byl patrný v celém rozsahu pokrytí signálem a činil cca 6 – 10 dB (až desetinásobný rozdíl výkonu). Z toho důvodu moduly s integrovanými patch anténami nedoporučuji pro aplikace, kde je potřeba spolehlivé pokrytí o poloměru větším, než několik metrů. V každém případě je výhodné použití všesměrových antén se ziskem v horizontální rovině. Modely antén modulu XBee jsou na obr. 3.9. Rozměry modelů, tj. plochy plošného spoje modemu zde modelované hustou mříží, odpovídají rozměrům modemu (24 x 25 mm). Délka zářiče originální antény (unipólu) Whip činí 26 mm. Simulátor elektromagnetických struktur 4NEC2 [50] je nástroj pro vizualizaci anténních geometrií a jejich vyzařovacích charakteristik.

Simulací modelu vyzařování antény typu Whip na modulu XBee jsem zjistil její teoretickou vyzařovací charakteristiku. Na obr. 3.10(a) je patrné, že vyzařování této antény je nerovnoměrné v obou rovinách, ač bez výrazných minim, v horizontální rovině (ve směru spojení) se sníženým ziskem cca -2,1 dB, s maximem +1.9 dBi (vůči izotropickému zářiči) v rovině s elevací -50°, ve směru osy symetrie modulu. Zajímalo mne, jak se změní diagram záření této antény, připojením dvou vodičů délky  $0,25 \lambda$  (28 mm pro kmitočet 2 450 MHz a činitel zkrácení 0,92 při průměru vodiče 0,5 mm) v blízkosti paty zářiče, konstrukčně podobné anténě typu GP s umělou zemní rovinou [45]. Na výstupu simulace tohoto modelu antény (obr. 3.10 b) je zřejmé výrazné minimum v ose zářiče a kruhová směrová charakteristika v horizontální rovině, což je pro všesměrové pokrytí signálem výhodné.

Praktickým měřením síly signálu (hodnoty parametru RSSI přijatých paketů) ve vzdálenosti 6 m a změnou azimutu rotací měřeného modulu kolem osy antény s krokem 10 úhlových stupňů jsem zjistil směrové charakteristiky na obr. 3.11. V každé pozici bylo přijato 100 paketů délky 32 byte, jejich hodnota aritmeticky průměrována, hodnoty všech měření normalizovány na nejvyšší k 0 dB a zaneseny do kruhového diagramu. Je zřejmé, že úpravou došlo k vyrovnání charakteristiky,

### 3.5 Legální podmínky pro zařízení IEEE®802.15.4



Obrázek 3.10: Směrová charakteristika antény Whip (a) (vlevo) a s úpravou (b) modulu XBee ve vertikální rovině.

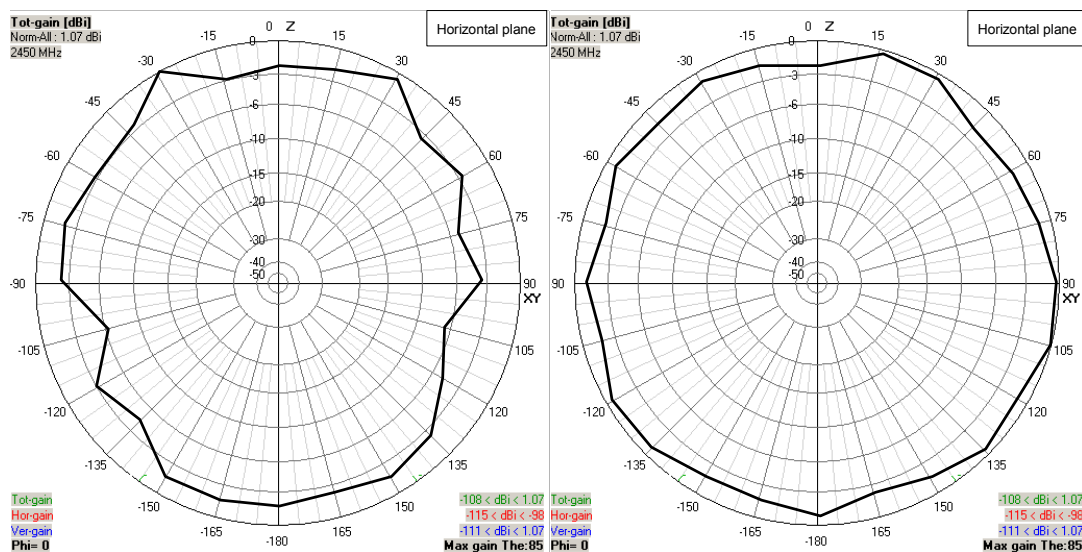
rozptyl hodnot klesl na 2,5 dB, namísto původních cca 10 dB. Je nutné podotknout, že uvedená měření jsou zatížena náhodnou chybou, způsobenou odrazy a rozptylem od okolních překážek, v jiném prostředí nebo v anechoické komoře by byl výsledek odlišný. Přesto jsou jako orientační měření s rozlišitelností 1 dB dostatečná.

V poloprostoru lze dosah rádiových signálů modulů XBee zvýšit další jednoduchou úpravou. Instalace plošného reflektoru do vzdálenosti cca 0,2 - 0,25  $\lambda$  (24 - 30 mm) rovnoběžně s osou zářiče zvýší směrovost o cca 3 dB (dvojnásobný výkon,  $\sqrt{2}$  násobný dosah) ve směru kolmém k rovině reflektoru. Rozměry plochy reflektoru nebudou kritické při rozměrech hran větších než 1  $\lambda$ , doporučená délka hrany je 1,1  $\lambda$  (135 mm). Rozměry reflektoru mnohem větší než 1  $\lambda$  se projeví aperiodicitou (nezávislost elektrických rezonančních parametrů na kmitočtu).

### 3.5 Legální podmínky pro zařízení IEEE®802.15.4

Uvedení do provozu a používání rádiových zařízení v pásmu ISM 2 400 – 2 483,5 MHz, tedy i zařízení dle IEEE®802.15.4 a ZigBee®, spravují příslušné předpisy vydané regulačními autoritami jednotlivých států. Česká republika je členem Evropské Unie a Evropské konference poštovních a telekomunikačních správ CEPT. Lokální regulační autoritou ČR je Český telekomunikační úřad [10]. Provoz zařízení využívající kmitočtové pásmo 2 400–2 483,5 MHz podléhá podmínkám uvedeným v těchto normách:

1. zákon č. 127/2005 sb. o elektronických komunikacích,



Obrázek 3.11: Měřená směrová charakteristika antény Whip v horizontální rovině před (vlevo) a po úpravě protiváhy unipólu.

2. Všeobecné oprávnění č. VO-R/ 12/ 08. 2005- 34 [12] k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení pro širokopásmový přenos dat na principu rozprostřeného spektra nebo OFDM v pásmech 2,4 GHz a 5 GHz. Dle článku 2, odst. b) povolené technické parametry rádiových stanic jsou:

- ▷ kmitočtové pásmo: 2 400,0 - 2 483,5 MHz,
- ▷ vyzářený výkon: 100 mW EIRP (equivalent isotropic radiated power) za podmínky dle odst. c), u systémů s rozprostřeným spektrem, které využívají techniku přímé sekvence nebo modulaci OFDM, nesmí spektrální hustota EIRP překročit hodnotu -20 dBW/1 MHz. Střední ekvivalentní izotropicky vyzářený výkon (EIRP) je výkon po dobu vysílání, který odpovídá nejvyššímu výkonu, pokud je použita regulace výkonu. Tato podmínka tedy omezuje vyzářený výkon anténou, ekvivalentní vyzářováním isotropnímu zářiči, na hodnotu

$$P_i = -20 \text{ dBW} = 10 \text{ dBmW} = 10 \text{ mW při šířce pásma 1 MHz.}$$

Standard IEEE802.15.4 stanovuje šířku komunikačního kanálu v pásmu 2,4 GHz na 2 MHz při OQPSK modulaci. Pro tuto šířku pásma a podmínky dle VO-R/ 12/ 08. 2005- 34 je tedy povolený vyzářený výkon EIRP roven dvojnásobku  $P_i$ , tedy 20 mW, to je 13 dBm.

Podle Všeobecného oprávnění č. VO-R/ 10/ 03.2007 - 4 k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení krátkého dosahu [11] a dle článku 3, odst. (2) jsou povoleny technické parametry stanic:

- ▷ kmitočtové pásmo: 2 400,0–2 483,5 MHz
- ▷ vyzářený výkon: 25 mW EIRP bez dalších omezujících podmínek.

Uvedené podmínky lze interpretovat takto:

- ▷ uživatel je povinen používat schválených antén dodávaných výrobcem
- ▷ uživatel může použít jiných (směrových) antén jiných výrobců za podmínky, že tuto možnost výrobce povoluje, a dodržet mez EIRP dle předpokládaného nebo změřeného zisku antény snížením vysokofrekvenčního výkonu dodávaného do antény.

Pro přesné znění podmínek cituji část textu Všeobecného oprávnění a poznámky pro provoz zařízení RLAN (WLAN) [11]:

„Výrobce nebo distributor zařízení je povinen v návodu k použití (který musí být v češtině přiložen ke každému zařízení) uvést podmínky, za nichž lze zařízení v ČR provozovat v souladu se všeobecným oprávněním VO-R/ 12/ 08.2005 - 34. Zejména musí výrobce nebo distributor uvést, jaký druh nebo typ antény může být u zařízení použit, aby zařízení splňovalo podmínky, za nichž byla posouzena shoda. Provozovatel rádiového zařízení je povinen na základě těchto informací výrobce dodržovat režim vysílání, který odpovídá výše uvedenému všeobecnému oprávnění. Obecně platí, že při použití směrové antény (pokud výrobce nebo distributor tento druh antény připouští) musí provozovatel snížit výkon zařízení tak, aby vyzářený výkon byl v souladu s všeobecným oprávněním. 2. Jak vyplývá ze všeobecného oprávnění, stanice jsou provozovány na sdílených kmitočtech. Provoz stanice nemá zajištěnu ochranu proti rušení způsobenému vysílacími rádiovými stanicemi jiné radiokomunikační služby provozovanými na základě individuálního oprávnění k využívání rádiových kmitočtů nebo jinými stanicemi pro širokopásmový přenos dat na principu rozprostřeného spektra nebo OFDM. Případné rušení řeší fyzické a právnické osoby vzájemnou dohodou. Nedohodnou-li se, postupuje se podle § 100 zákona o elektronických komunikacích, případně zastaví provoz ten uživatel, který uvedl do provozu stanici způsobující rušení později.“

Tyto podmínky vycházejí z rozhodnutí Evropské konference poštovních a telekomunikačních správ (CEPT) o rádiových zařízeních a telekomunikačních koncových zařízeních a vzájemném uznávání jejich shody, jakož i z požadavků vyplývajících z výkonu správy rádiového spektra. Výklad Evropské komise týkající se antén je uveden v Příručce ke směrnici 1999/ 5/ ES o rádiových zařízeních a telekomunikačních koncových zařízeních, podle dokumentů Evropské komise zpracoval Úřad pro technickou metrologii, normalizaci a státní zkušebnictví – Sborník dokumentů technické normalizace, svazek č. 25, Praha, srpen 2003, [6].





## 4 Moduly bezdrátové komunikace XBee® a XBee-PRO®

Jedním z požadavků zadavatele je použití komerčně dostupných modulů pro bezdrátovou komunikaci. Konkrétní rozhodnutí bylo učiněno pro modulární transceiver standardu IEEE802.15.4 firmy Digi International Inc. (dříve Maxstream Inc.) [14] s obchodním označením XBee®/XBee-PRO® OEM RF Modules. Tyto moduly jsou na českém trhu běžně dostupné od několika dodavatelů, ve srovnání s nabídkou jiných výrobců, za velmi příznivou cenu. To byl jeden z faktorů jejich výběru.

Tato kapitola poskytne stručný přehled vlastností a návod k použití modulů XBee®, přitom čerpá převážně z dokumentace výrobce (Product Manual v1.xCx - 802.15.4 Protocol, For OEM RF Module Part Numbers: XB24-...-001, XBP24-... -001) [32], není-li uvedeno jinak.

Moduly XBee existují ve dvou variantách, XBee® Series I a Series II:

- ▷ varianta Series I je funkčně vybavena pouze protokolem IEEE®802.15.4 na úrovni fyzické vrstvy a přístupu k médium (PHY, MAC),
- ▷ varianta Series II je ve srovnání s variantou Series I rozšířena o síťovou vrstvu protokolem ZigBee® [7].

Při konzultacích se zadavatelem této práce byly pro realizaci sítě zvoleny moduly varianty Series I. Důvody pro toto rozhodnutí jsou:

1. moduly varianty Series II jsou vybaveny síťovým protokolem ZigBee® a jsou určeny především pro uživatelské aplikace,
2. implementace protokolu ZigBee v modulu Series II je proprietární a neumožňuje uživateli přístup k funkcím nižších vrstev IEEE®802.15.4 (nelze obejít aplikační vrstvu protokolu),
3. je vyvíjena volně šířitelná implementace protokolu ZigBee® - OpenZB [20],
4. v době poptávky byly v nabídce pouze verze modulů Series II vybaveny firmware s omezenou funkcionalitou,
5. moduly varianty Series I jsou vhodnější pro experimenty například s testováním nových síťových anebo směrovacích protokolů, neboť mají implementovány pouze vrstvy PHY a MAC standardu IEEE®802.15.4.

## 4.1 Přehled vlastností modulů XBee® Series I

Moduly XBee® jsou vyvinuty v souladu se standardem IEEE®802.15.4 a současně splňují potřeby konstruktérů a uživatelů bezdrátových spojů nízkými pořizovacími náklady, spolehlivostí a variabilitou. Použitím moderních konstrukčních prvků, podporujících doporučení standardu, mohou spolehlivě komunikovat i se zařízeními a modemy jiných výrobců, splňující IEEE®802.15.4. Vysokofrekvenční rádiová část pracuje v ISM pásmu 2,4 GHz a oba typy modulů jsou kompatibilní na úrovni fyzické vrstvy a přístupu k médium (PHY, MAC), komunikačního rozhraní UART a vstupních i výstupních signálů.

Porovnání parametrů modulů XBee® a XBee-PRO® jsou na obr. 4.1.

### 4.1.1 Porovnání modulů XBee® Series I a XBee® Series II

Varianty modulů XBee® Series I a XBee® Series II se liší především v rozšíření o implementaci protokolu ZigBee® u varianty Series II, konfiguračními a komunikačními možnostmi, osazením odlišnými konstrukčními prvky a některými elektrickými parametry. Shodné jsou v mechanickém provedení, komunikačním rozhraní a přiřazení signálových vývodů. Blokové schéma interní struktury modulu XBee® Series I je na obr. 4.2

Moduly XBee® Series I jsou postaveny na obvodech firmy Freescale, obsahují osmibitový mikrokontrolér MC9S08JM60 s 60 kB programové paměti Flash a 4 kB operační paměti RAM [35] a rádiový transceiver MC13213 [34]. Moduly XBee® Series II jsou vyrobeny na bázi obvodů firmy Ember [33], bližší informace nebyly dostupné.

### 4.1.2 Moduly XBee®/XBee®PRO DigiMesh2.4

V době zpracování tohoto textu (leden 2009) byly na trh uvedeny moduly s označením XBee®/XBee®PRO DigiMesh2.4 OEM RF modules. Tyto moduly integrují kromě PHY a MAC vrstev i síťovou vrstvu s podporou sítě typu Mesh. [14]

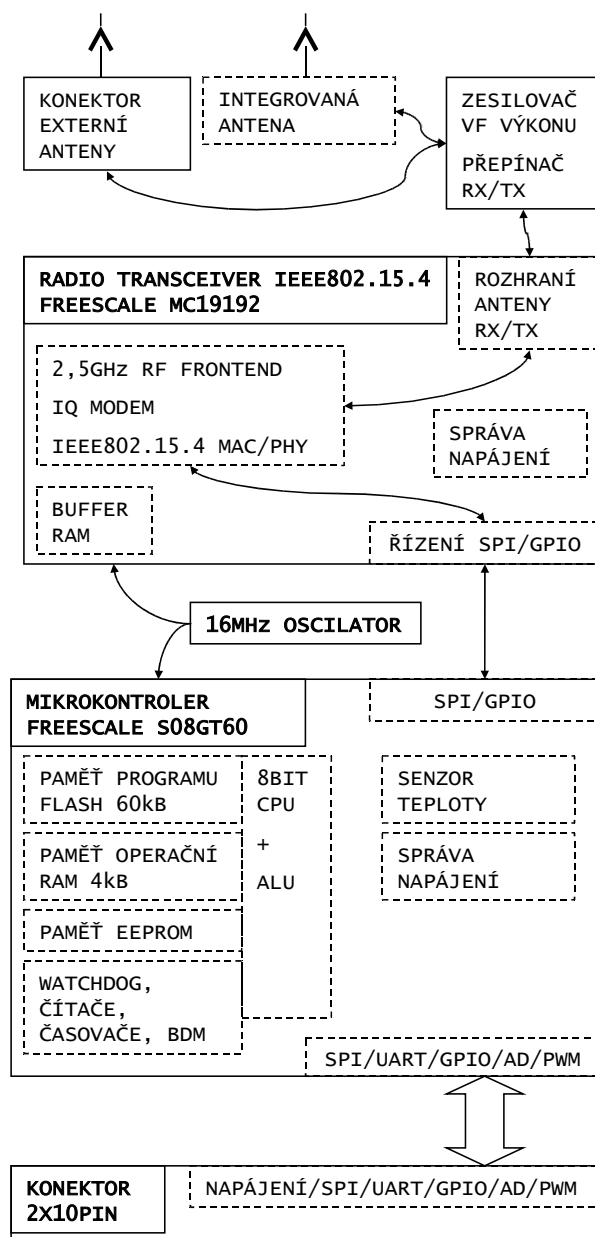
Pro naši potřebu by mohly být tyto moduly výhodné, neboť nebude nutné mít síťovou vrstvu implementovanou v operačním systému a výkon nadřazeného mikrokontroléru bude k dispozici pro jiné úkoly.

Moduly XBee SeriesI a XBee DigiMesh jsou slučitelné hardwarově a jejich vlastnosti lze měnit aktualizací firmware. Postup aktualizace popisuje doporučení výrobce a provádí se programem X-CTU, jenž je součástí podpory výrobce k nastavování parametrů modulů a aktualizacím firmware.

#### 4.1 Přehled vlastností modulů XBee® Series I

Model modulu	XBee	XBee-PRO
Dosah s překážkami	do 30 m (100ft)	do 90 m (300ft) 60m (200ft) mezinárodní verze
Dosah s přímou viditelností	do 90 m (300ft)	do 1600 m (1míle) 750m (2500ft) mezinárodní verze
Výstupní VF výkon max. (volitelný softwarově)	1 mW (0dBm)	63 mW (18dBm)* 10 mW (10dBm) pro mezinárodní verzi
Rychlost dat na úrovni PHY vrstvy	250 kb/s	250 kb/s
Rychlost dat sériového rozhraní (volitelná softwarově)	1200 b/s – 250 kb/s	1200 b/s – 250 kb/s
Pracovní kmitočet	ISM 2,4 GHz	ISM 2,4 GHz
Počet kanálů	16 DSSS kanálů	12 DSSS kanálů
Citlivost přijímače	-92 dBm (1% PER)	-100 dBm (1% PER)
<b>Parametry napájení</b>		
Napájecí napětí	2,8 – 3,4 V	2,8 – 3,4 V
Proud při vysílání (typický)	45 mA (při 3,3 V)	250 mA (při 3,3 V) (150 mA mezinárodní verze) RPSMA verze: 340 mA (při 3,3 V) (180 mA mezinárodní verze)
Klidový proud přijímače (typ.)	50 mA (při 3,3 V)	55 mA (při 3,3 V)
Proud úsporného módu	< 10 µA	< 10 µA
<b>Fyzikální parametry</b>		
Rozměry	24,38 x 27,61 mm	24,38 x 32,94 mm
Pracovní teplota	- 40 do 85 °C	- 40 do 85 °C
Antény	integrovaná Whip, Chip, U.FL konektor, RPSMA konektor	integrovaná Whip, Chip, U.FL konektor, RPSMA konektor
<b>Síťové parametry</b>		
Podporované topologie	Point-to-point, Point-to-multipoint, Peer-to-peer	Point-to-point, Point-to-multipoint, Peer-to-peer
Adresování	PAN ID, síťové 16-bit adresy, 64-bit	PAN ID, síťové 16-bit adresy, 64-bit
<b>Certifikace</b>		
USA (FCC Part 15.247)	OUR-XBEE	OUR-XBEEPRO
Canada (IC)	4214A XBEE	4214A XBEEPRO
Evropa (CE)	ETSI	ETSI (max. 10 dBm výstupní výkon)

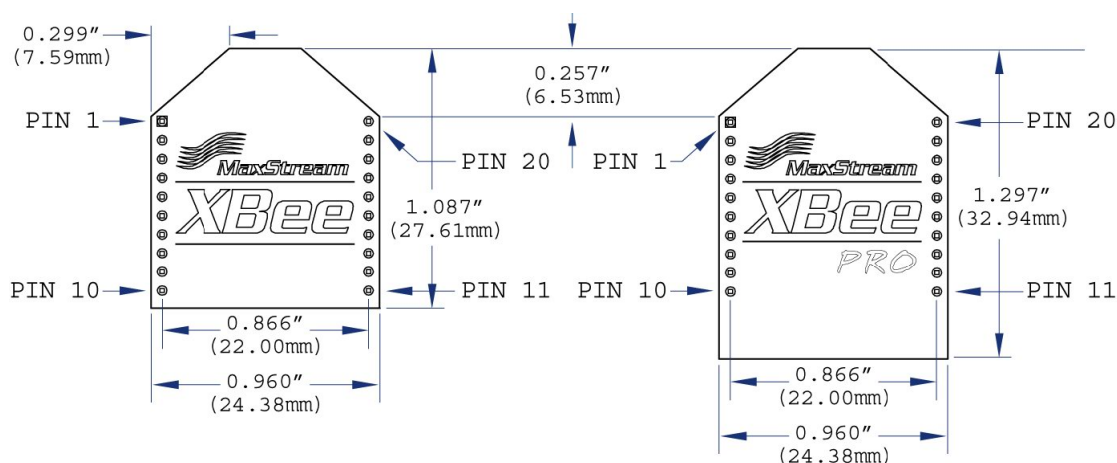
Obrázek 4.1: Porovnání modulů XBee® a XBee-PRO®



Obrázek 4.2: Blokové schéma interní struktury modulu XBee® Series I

Tabulka 4.1: Přiřazení a popis signálů a vývodů XBee®

#	název	směr	popis
1	VCC		Napájení 3.3V
2	DOUT	výstup	UART Data TX
3	DIN/CONFIG	vstup	UART Data RX
4	DO8*	výstup	Digital výstup 8
5	RESET	vstup	Reset (puls musí trvat alespoň 200 ns)
6	PWM0 / RSSI	výstup	PWM výstup 0 / RX síly signálu Indikátor
7	PWM1	výstup	PWM výstup 1
8	rezerva		
9	DTR/SLEEP_RQ/DI8	vstup	sleep Control Line nebo Digital vstup 8
10	GND		nulový potenciál napájení - zem
11	AD4 / DIO4	oba	Analog vstup 4 nebo Digital I/O 4
12	CTS / DIO7	oba	CTS řízení toku nebo Digital I/O 7
13	ON / SLEEP	výstup	Status Indikátor
14	VREF	vstup	Napěťová reference pro A/D vstup
15	Assoc/AD5/DIO5	oba	Asociace Indikátor, Analog vstup 5 nebo Digital I/O 5
16	RTS/AD6/DIO6	oba	RTS řízení toku, Analog vstup 6 nebo Digital I/O 6
17	AD3 / DIO3	oba	Analog vstup 3 nebo Digital I/O 3
18	AD2 / DIO2	oba	Analog vstup 2 nebo Digital I/O 2
19	AD1 / DIO1	oba	Analog vstup 1 nebo Digital I/O 1
20	AD0 / DIO0	oba	Analog vstup 0 nebo Digital I/O 0



Obrázek 4.3: Výkres a rozměry modulů XBee® (převzato z dokumentace [32])

### 4.1.3 Mechanické provedení a signály modulů XBee®

Přiřazení a popis signálů a vývodů XBee®/XBee-PRO® obsahuje Tab. 4.1.

Výkres a rozměry modulů XBee® a XBee-PRO® jsou na obr. 4.3

## 4.2 Sítě XBee®

Řídící software (firmware) modulů XBee® podporuje tyto typy sítí standardu IEEE 802.15.4:

- ▷ Peer-to-Peer (P2P) síť bez použití majáku - typ ad-hoc síť

- ▷ Koordinované sítě s centrálním uzlem (koordinátorem) bez použití majáku a zaručeného přístupu (GTS) - síť typu hvězda

### 4.2.1 Peer-to-Peer (P2P) síť XBee®

Topologie Peer-to-Peer sítě je implicitním nastavením modulů XBee® a používají řízení přístupu k médiu MAC bez majáku aplikací náhodného (unslotted CSMA-CA) přístupu dle sekce 5.5 textu Std IEEE®802.15.4. Každý uzel v síti má schopnost vysílat i přijímat data od kteréhokoli uzlu náležícího stejné PAN síti. Dle výrobce umožňuje tato topologie rychlou synchronizaci a odezvu při připojování. Konfigurační příkazy pro tuto topologii jsou CE=0 (koncový uzel), A1=0 (asociace nepovolena) a identické ID a CH (PAN ID a rádiový kanál). Tento typ sítě je výchozím a je možné jej použít pro účel navrhované sítě.

### 4.2.2 Koordinované síť XBee®

Síť této topologie je řízena jedním uzlem, koordinátorem, k němu se ostatní uzly připojují a vytvářejí tak síť typu hvězda. koordinátor může plnit funkci směrovače mezi uzly. Přímá komunikace mezi uzly však není možná.

Bližší informace o síťových protokolech manuál XBee® neobsahuje.

### 4.2.3 Adresování v sítích XBee®

V sítích XBee® lze použít dva typy adresování:

#### Unicast

znamená přímé adresování jediného adresáta datagramu. Lze nastavit krátkou 16-bitovou adresu příkazem DL=(dolních 32 bitů adresy) a DH=(0x0000), nebo 64-bitovou adresu příkazem DL=(dolních 32 bitů adresy) a DH=(horních 32 bitů adresy), tento mód je implicitní. Jedině v tomto módu MAC vrstva používá potvrzování (ACK) a retransmisi třemi pokusy (neměnný parametr). Datagram s rámcem tohoto typu přijme pouze modul s odpovídající adresou (MAC adresáta), moduly s jinými adresami tento datagram přijmou pouze vrstvou PHY, MAC vrstva jej odmítne. Tuto vlastnost vykazuje firmware verze 10A5 i aktuální verze 10CD, dostupné v době psaní toho textu.

## Broadcast

znamená obecné adresování všech uzlů v dosahu rádia. Lze opět použít 16-bitovou adresu příkazem DL=(0xFFFF) a DH=(0x0000), nebo 64-bitovou adresu příkazem DL=(0x0000FFFF) a DH=(0x00000000). V tomto módu se doručení nepotvrzuje a nedochází k retransmisi. Kterýkoli modul v dosahu přijme datagram s touto adresou a předá prostřednictvím rozhraní sériové komunikace.

### 4.2.4 Pracovní módy XBee®

Po připojení napájení jsou moduly implicitně nastaveny pro operace v takzvaném transparentním módu jako náhrada sériového rozhraní. Všechna data přijatá sériovým rozhraním na vstupu DI jsou uložena do fronty délky 34 Bytů pro odeslání bezdrátovým rozhraním dle aktuální konfigurace. Datové rámce přijaté bezdrátovým rozhraním jsou přeposílána na sériové rozhraní výstupem DO. Operační stavy v nichž se vnitřní logika modulů může nacházet znázorňuje obr. 4.4

Alternativou transparentního módu je API (Application Programming Interface) mód, který rozšiřuje přístup aplikací uživatele k systémovým službám modulu. V API módu jsou všechna data tekoucí sériovým rozhraním ve formátu API. Příkazy a aplikační data uživatele jsou součástí API rámců, není tedy nutné přepínat mezi transparentním a příkazovým módem. Aplikace uživatele posílá API rámce obsahující současně adresu a vlastní data, modul předává data API rámcu spolu s informací o stavu přenosu, zdroji a síle signálu rámce přijatého bezdrátovým rozhraním. Výrobce v dokumentaci definuje typy API rámců, jejichž popis zde neuvádím pro jejich velký rozsah. Některé detaily API módu jsou uvedeny v implementační kapitole, zdrojových textech a dokumentaci modulů XBee®.

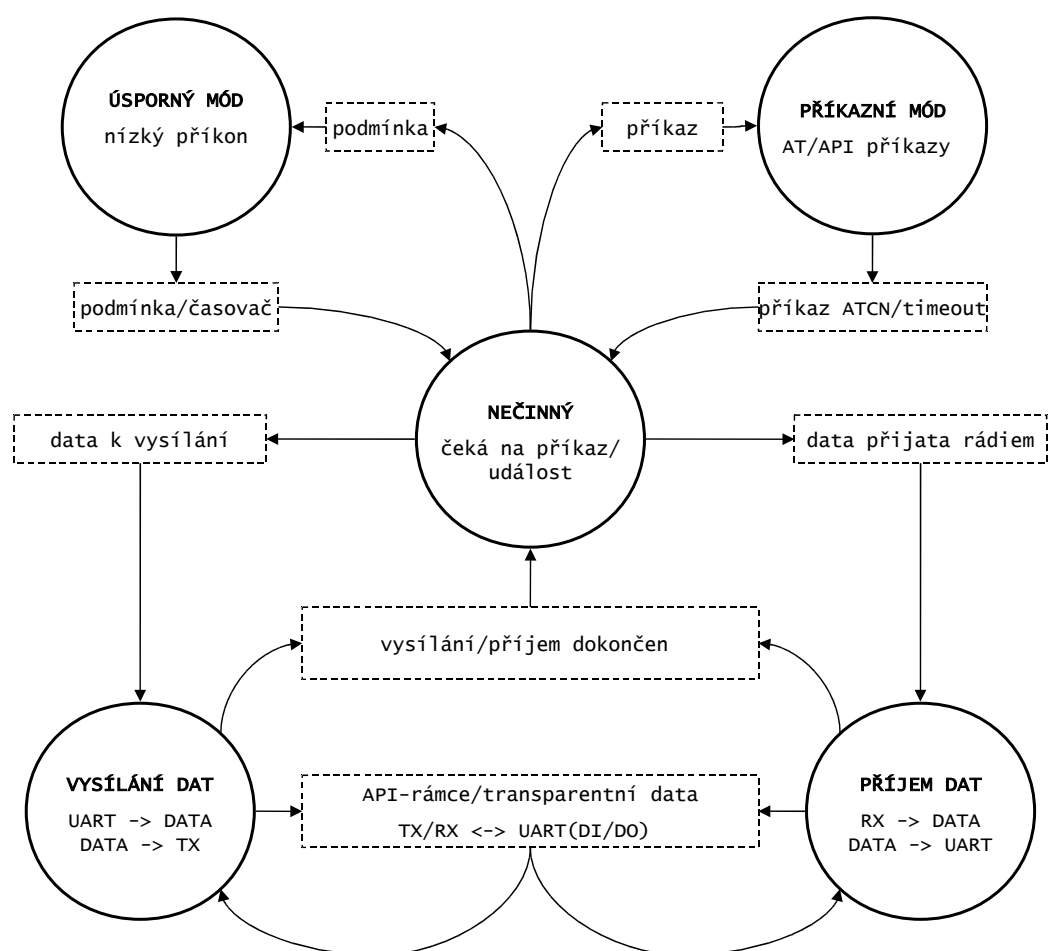
Komunikační stavy modulů XBee® ukazuje obr. 4.6

### Tok dat mezi sériovým a bezdrátovým rozhraním

Před odesláním dat bezdrátovým rozhraním jsou data uložena ve frontě dokud není splněna jedna z následujících podmínek a data jsou poté převedena na datový rámec pro odeslání:

1. na sériovém rozhraní není přijat znak po dobu nastavenou parametrem <RO>
2. sériovým rozhraním byl přijat maximální počet znaků, kolik umožňuje datová oblast rámce IEEE®802.15.4 (100 znaků)
3. je přijata sekvence pro vstup do příkazového módu. Všechny znaky ve frontě, před příchodem sekvence pro vstup do příkazového módu, jsou odeslány.

Prevenci ztráty dat a přetečení fronty sériového rozhraní zajišťují tyto mechanismy:



Obrázek 4.4: Stavový diagram pracovních módů modulů XBee®



	start rámce	délka rámce		data rámce	kontrolní součet
pořadí	1	2 - 3		4 - n	n + 1
počet	1	2		n	1
hodnota	0x7E	MSB	LSB	API struktura	x
				API identifikátor cmdID	data API identifikátoru cmdData

Obrázek 4.5: Formát API rámce

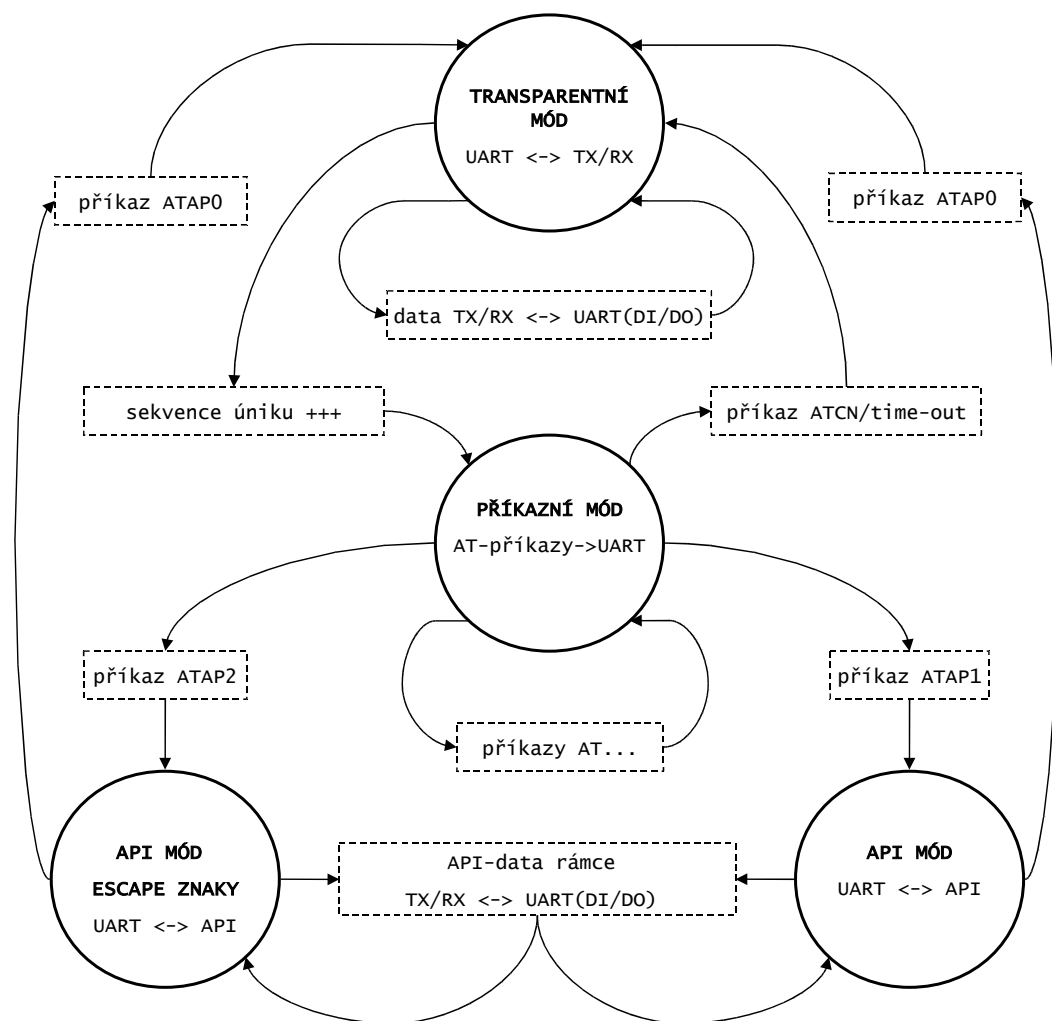
- ▷ řízení toku signálem CTS (Clear to Send) pro příjem dat vstupem DI
- ▷ řízení toku signálem RTS (Ready to Send) pro předávání dat vstupem DO
- ▷ řízení toku řídicími znaky v API rámci (XON/XOFF) pro příjem i předávání dat

### Specifikace API XBee®

Formát rámce API je podobný strukturou rámcům HDLC/PPP protokolu (Request for Comments: 1549 [44]), obecná struktura je na obr. 4.5.

### Příkazy pro vzdálené zpracování

API protokol umožňuje provádění příkazů na vzdálených uzlech použitím rámce typu API Remote Command Request. Vzdálené příkazy mohou na vzdáleném uzlu číst nebo nastavovat parametry prostřednictvím AT příkazů. Detaily této procedury jsou detailně popsány v manuálu modulů XBee® na straně 26 [32].



Obrázek 4.6: Komunikační stavy modulů XBee®

## 5 Realizace prvků sítě

V úvodu této významem hlavní kapitoly stanovíme důležité částečné cíle, problémy s nimi spojené a návrh jejich řešení. Přístup k problematice rozdělíme na dvě systematické kategorie: část spojenou s fyzickou realizací prvků sítě (hardware) a část řešící řídicí software těchto prvků.

### 5.1 Koncepce a návrh technického vybavení

Při úvahách a průzkumu jsem vycházel z charakteristik vybraných technologických prvků, dokumentace a dostupných vývojových prostředků. Dle předpokládaného účelu použití v aplikacích robotiky a mechatroniky vychází potřeba modulární a současně kompaktní konstrukce. Modul základní desky s MCU ATmega128 je vybaven distančními sloupky pro mechanickou montáž a řadové konektory 2 x 10 pinů pro připojování dalších modulů. Propojení jednotlivých modulů (desek plošných spojů) do funkčního celku zajistí plochý kabel opatřený konektorovými zásuvkami. Navrhovaný modul je minimalistického pojetí, slučuje nejnutnější prvky pro zprovoznění a testování komunikace v síti.

#### 5.1.1 Konstrukční prvky

##### **Základová deska modulárního vývojového systému MB-ATmega128**

Tato základová deska je určena pro vývojové a výukové účely, proto je poměrně univerzální a umožňuje připojení mnoha rozšiřujících modulů či uživatelského hardware. Deska obsahuje 8-bitový RISC mikrokontrolér Atmel ATmega128-16AI v pouzdru TQFP64 s dvoucyklovou násobičkou, s 32 osmibitovými registry, s pamětmi 4 kB EEPROM a 4 kB interní SRAM. Dalšími komponenty mikrokontroléru jsou AD převodník s volbou napěťové reference, dva 8-bitové čítače, dva 16-bitové čítače, dva 8-bitové PWM kanály, čítač reálného času RTC a 6 režimů snížené spotřeby. Mikrokontrolér se programuje ISP nebo JTAG programátorem připojeným na příslušný konektor. Pro vytváření programového kódu je možné použít volně dostupný vývojový software Atmel AVR Studio či WinAVR-GCC. Všechny 53 programovatelných I/O vývodů je na konektorech, na které je možné připojit přídatné moduly či uživatelský hardware. Další komunikace je možná přes 2 odpojitelná sériová rozhraní RS-232. Na desce je také asynchronní SRAM paměť 128k

x 8bit - 55ns s možností volby připojení řídicích vodičů k MCU. Desku lze napájet stejnosměrným napětím v rozsahu 6,5 až 9 V. Výrobce modulárního vývojového systému (MVS) je firma PKDesign [21].

### **Modul 8 LED diod a 8 tlačítek**

je přídatný modul modulárního vývojového systému (MVS), který slouží pro zobrazení 8 signálů LED diodami a nastavování 8 binárních signálů tlačítky. Připojuje se k základové desce MVS kabelovou spojkou konektorem CON1. LED diody jsou svými katodami přes ochranné rezistory připojeny ke konektoru CON1, anody jsou připojeny na +5 V. Také tlačítka jsou připojena jedním kontaktem na konektor CON1 a zároveň na rezistory, připojené na napájecí napětí +5 V. Druhý kontakt spínacích tlačítek je připojen na společný vodič GND.

### **Modul akcelerometru**

je osazen integrovaným obvodem MAA7260 firmy Freescale, instalovaným v modulu ACC7260 společně se stabilizátorem napětí. Výrobce tohoto modulu je firma Snail Instruments.

## **5.1.2 Nástroje pro vývoj**

Vývoj konstrukcí pro vestavné systémy se zpracováním analogových i digitálních signálů vyžaduje znalosti analogové techniky, logických i vysokofrekvenčních obvodů. Rychlé digitální obvody generují vysokofrekvenční energii v širokém spektru kmitů, případná vazba na analogové obvody zpracovávající signály s nízkou úrovní a nízkým šumem, může zcela znehodnotit výsledky měření a vyhodnocení.

Bez jistého minimálního přístrojového vybavení je velmi obtížné dosáhnout uspokojivých výsledků. Vybavení měřicími přístroji bylo následující: multimetr Fluke87, zdroj stabilizovaného napětí 1,25 - 25 V a proudu, osciloskop.

Používal jsem zpravidla dva osobní počítače vybavené operačními systémy Linux (distribuce grml [15], klon Debian) a Windows2000SP3.

Na stroji s OS Linux je instalováno kompletní vývojové prostředí GCC s extenzí AVR a CVS aktualizovaný strom zdrojů TinyOS. Zde probíhá hlavní proces kompilace a testování. Zároveň zde běží server SSH, FTP a VNC pro dálkový přístup, jsou k dispozici aplikace pro programování MCU ATmega128 přes JTAG rozhraní a USB adaptér UniProg JTAG ICE firmy PKDesign.

Druhý stroj s OS Windows2000 je používán jako pracovní stanice a pro dálkový přístup k PC s OS Linux. Na něm je možné také kompletní vývojové prostředí GCC a TinyOS ovšem pouze s emulací prostředí OS Linux s podporou Cygwin

[13], tuto možnost jsem prakticky nevyužíval, stabilnější je kompilace v nativním prostředí OS Linux.

Pro ladění programového kódu přímo v běžícím procesoru ATmega byl využíván adaptér JTAG UniProg ve spojení s integrovaným debuggerem AVRStudio. Příprava souboru ve formátu objektu pro symbolické ladění typu DWARF2 probíhá po překladu zdrojových textů příkazem

```
make xbeeat avrst
```

provedeném v adresáři se zdrojovými texty kompilované aplikace. Vygenerovaný soubor mainexe.elf lze načíst přímo do AVRStudio debuggeru a spustit ladící proces, kde je možné sledovat instrukční sekvence programu, nastavovat zarážky (breakpoints) a krokovat po instrukcích nebo logických blocích ve zdrojovém textu aplikace a příslušných knihoven (po nastavení cest ke zdrojovým souborům).

Schematické zobrazení vývojového prostředí ukazuje obr. 5.1.

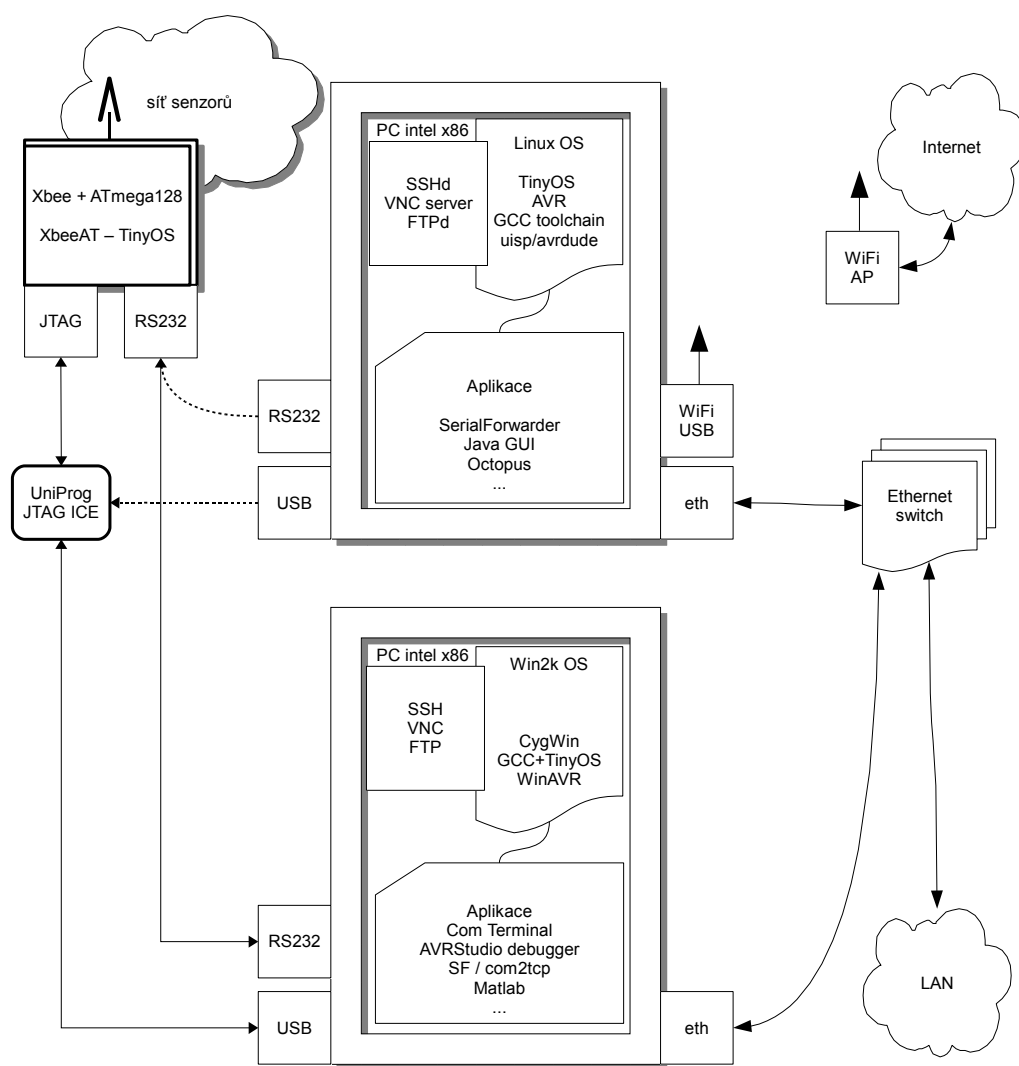
### 5.1.3 Realizace

Základním úkolem realizace fyzické části je navrhnout, verifikovat, připravit a vyrobit základní elektronický modul - adaptér integrující elektronické prvky. Tento adaptér propojí základovou desku MB-ATmega128, modul XBee®, modul akcelerometru a indikátory LED.

V souladu s požadavkem zadání této práce v bodě c) jsem učinil návrh a vyrobil funkční prototyp prvků bezdrátové senzorické sítě. Vycházel jsem z dostupných informačních zdrojů, dokumentace a specifikací jednotlivých komponent, doporučení výrobců, internetových diskuzí a vlastních zkušeností. Při koncipování bylo nutné splnit následující úkoly pro úspěšnou realizaci prototypu. Na straně elektroniky bylo nutné navrhnout a vyrobit modul propojení základní desky s MCU ATmega128 a modulů XBee®. Pro vývoj základního programového vybavení jsem zvolil operační systém TinyOS. V tomto operačním systému se podařilo implementovat jednotlivé ovladače pro příslušná hardwarová rozhraní. Pro testování ovladačů existuje několik aplikací. V rozsahu požadavků na funkcionalitu funkčního celku byla navržena aplikace pro kolekci dat koncových uzlů, ovládání prvků a monitorování sítě. Funkční vybavení jednotlivých uzlů lze dále rozšiřovat aktualizací aplikačního kódu v jednotlivých uzlech.

### 5.1.4 Adaptér propojení

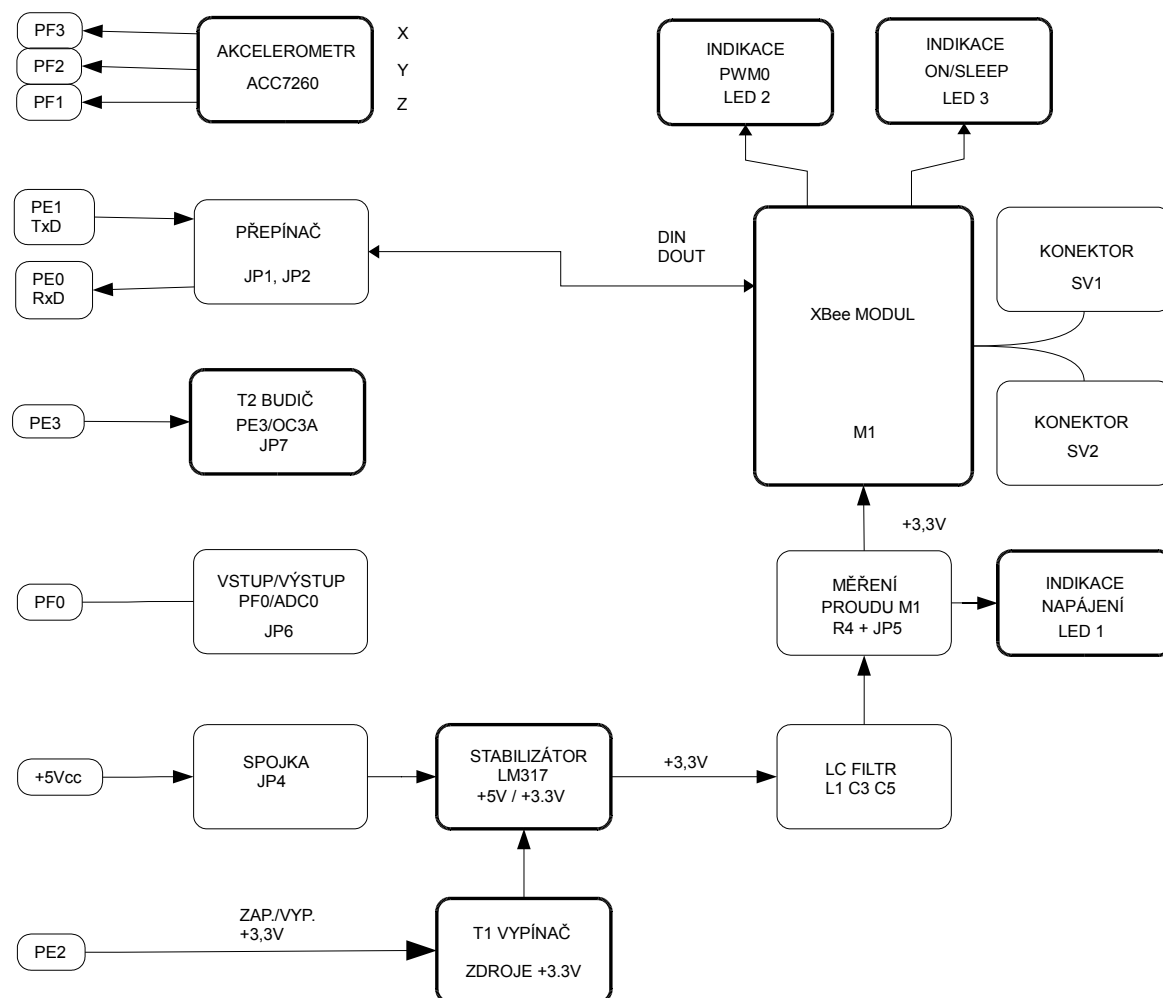
Propojení základové desky MB-ATmega128 a modulu XBee® sestává z adaptéru a propojovacích kabelů s ohledem na zachování modulární koncepce celého systému. Návrh plošných spojů jsem učinil v systému CadSoft EAGLE Layout Editor v. 5.4.0 [8]. Deska adaptéru je oboustranně osazená prvky, jednostranně pokovená, neřešitelné plošné spoje nahrazuje několik drátových propojů. Na straně



Obrázek 5.1: Schéma vývojového prostředí pro platformu XBeeAT TinyOS

plošných spojů jsou osazeny výhradně součástky pro plošnou montáž, na horní straně ostatní prvky. Schéma zapojení a motiv desky adaptéru je v příloze a soubory ve formátu CadSoft EAGLE Layout Editoru a PDF jsou uloženy na CD-ROM.

Blokové schéma adaptéru je na obr. 5.2.



Obrázek 5.2: Blokové schéma adaptéru XBeeAT

Tato deska se připojuje k základové desce MVS ke konektoru CON2, kde jsou potřebné signálové vodiče na portech PE a PF MCU ATmega.

Napájecí napětí prvků základové desky je +5 V a doporučené napájecí napětí modulu XBee je +2,7 V až +3,6 V. Stabilizaci napětí zajišťuje nastavitelný regulátor LM317T. Rezistorovým děličem R5 a R9 je nastaveno výstupní napětí cca +3,2 V, které je indikováno diodou LED1. Hodnoty rezistorů byly vypočteny podle vztahu uvedeného v dokumentaci k obvodu LM317T [24] a aproximovány na nejbližší hodnoty v řadě.

Pro případ potřeby řízené inicializace (restartu) modulu XBee anebo úspory energie je vhodné napájecí napětí modulu vypínat. To umožňuje zapojení tranzistoru T1 k rezistoru R9, resp. k vývodu regulátoru ADJ. Logická úroveň 1 na PE2 (vývod MCU základové desky) a proud do báze tranzistor T1 otevře a sníží impedanci vývodu ADJ vůči GND na několik desítek ohmů a výstupní napětí regulátoru klesne na napětí shodné s napětím vnitřní reference 1,25 V. Tento obvod snížení výstupního napětí stabilizátoru způsobí vyřazení modulu XBee z provozu a po obnově napájecího napětí dojde k jeho restartu. Zcela odpojit napájecí napětí +5 V pro tuto desku lze spojkou JP4.

V obvodu napájecího napětí +3,3 V i +5 V jsou zařazeny filtry typu dolní propust ve spojení kapacit 100 nF a indukčností L1 a L2 sloužící k oddělení vysokofrekvenčních obvodů modulu XBee® a ostatních obvodů. Instalace těchto filtrů zabrání případnému šíření vysokofrekvenčních proudů, ovlivňování parametrů připojených polovodičů a vyzařovací charakteristiky modulu.

V přívodu napájení modulu XBee PIN1 je zapojen rezistor R4 ( $1\Omega$ ), na němž lze měřit úbytek napětí - odběr proudu modulu. Volbou této hodnoty bude proud v ampérech numericky odpovídat měřenému úbytku napětí ve voltech. Úbytek napětí by neměl být větší než cca 250mV při instalovaném modulu XBeePRO, protože jeho proudový odběr by neměl přesáhnout hodnotu 250 mA. Nižší napájecí napětí cca 2,9 V by nemělo ovlivnit funkci modulu (ověřeno). Vyřazení rezistoru zajistí zasunutí zkratovací spojky JP5.

K optické indikaci jsou na desce LED diody, indikující stav modulu XBee a to dioda LED2 připojená přes rezistor na vývod PIN6 PWM0/RSSI a indikuje dle konfigurace buď úroveň signálu posledního přijatého datagramu nebo nastavitelnou hodnotu PWM výstupu. Dioda LED3 připojená přes rezistor na vývod PIN13 = ON/SLEEP a indikuje status modulu, pohotovostní stav nebo úsporný režim spánku.

Spojkami JP1 a JP3 je možné odpojit vodiče DIN, DOUT sériového rozhraní modulu XBee od MCU vodičů TxD a RxD, případně je spojit do lokální smyčky propojením vodičů PE0 a PE1 jednou spojkou k testování funkce modulu UART.

JP6 slouží jako konektor k připojení externího senzoru ke vstupu ADC0/PF0, nebo jej lze konfigurovat jako výstup logické úrovně. Vstup MCU PF0 je chráněn rezistorem R13.

Modul akcelerometru je osazen integrovaným obvodem MAA7260 firmy Freescale [36], instalovaným v modulu ACC7260 společně se stabilizátorem napětí. Je napájen +5 V a výstupy napětí souřadnic X, Y, Z jsou přes ochranné rezistory zapojeny na přívody AD převodníku MCU přes konektor CON2.



### 5.1.5 Připojení modulů XBee®

Připojení modulu Xbee sériovým rozhraním UART k mikrokontroléru lze uskutečnit přímým spojením signálových vodičů RxD - DO a TxD - DI. Je důležité upozornit, že přímé spojení TxD - DI je možné pouze v případě, kdy je připojený mikrokontrolér v provozu s napájecím napětím nejvýše 3,6 V. Vyšší napětí než  $V_{cc} + 0,3V$  na vstupním přívodu DI (a kterémkoli jiném přívodu) modulu XBee způsobí tok proudu ochrannými diodami a není-li tento proud omezen, může dojít ke zničení vnitřní struktury interního mikrokontroléru. Podle dokumentace mikrokontroléru MC9S08JM60 Series Data Sheet [35] činí omezení maximální absolutní hodnoty proudu pro kterýkoli přívod 25 mA.

Pro bezpečné propojení lze zvolit tyto varianty:

- ▷ použít převodník napěťových úrovní,
- ▷ omezit proud ochrannými diodami rezistorem.

Ačkoli první varianta je technicky moderní a elegantní, v případě propojení pouze jednoho vodiče je však neefektivní. Převodníků napěťové úrovně je na trhu bohatá nabídka, pro tento účel však postačí propojení rezistorem v sérii.

Pro napájecí napětí modulu  $U_i = 3,3\text{ V}$  a výstupní úroveň  $U_o = 5\text{ V}$  z výstupu Tx mikrokontroléru vypočítáme hodnotu rezistoru pro omezení vstupního proudu ochrannými diodami dle vztahu:

$$R = (U_o - U_i) / I \quad [\Omega; V; A]$$

kde  $U_o$  je napětí výstupu,  $U_i$  žádané nejvyšší napětí na vstupu a  $I$  je proud tekoucí rezistorem  $R$  a ochrannými diodami v krajním případě.

Současně je vhodné nezvyšovat příliš impedanci propojení tímto rezistorem a použít jeho hodnotu v řádu jednotek  $k\Omega$ . Důvodem je snížení odolnosti vůči případnému rušení elektromagnetickým polem okolí při delších vodičích mezi mikrokontrolérem a modulem. To znamená volit kompromisní hodnotu omezujícího rezistoru; pro  $I = 1\text{ mA}$  je  $R = 1,7\text{ k}\Omega$ , zvolíme nejbližší vyšší bezpečnou hodnotu v řadě  $R = 1,8\text{ k}\Omega$ . Hodnota rezistoru není kritická, vyhoví pravděpodobně i hodnota nižší i řádově vyšší. Pro účel přímého spojení s mikrokontrolérem v jednom funkčním celku toto řešení vyhoví a dosáhneme dostatečné spolehlivosti.

Propojení signálů výstupu DO modulu XBee® a vstupu RxD UART mikrokontroléru bude bezproblémové, neboť úroveň CMOS při napájecím napětí 3,3 V jsou v mezích vstupních úrovní mikrokontroléru napájeného napětím 5 V.

## 5.2 Koncepce a návrh programového vybavení

Úkoly spojené s návrhem a výrobou programového vybavení jsou ve srovnání s návrhem hardware mnohem náročnější, neboť jen struktura operačního systému

TinyOS a prostudování rozsáhlé dokumentace je časově náročná. Globálním cílem je vytvořit komponenty, ovladače a řídicí algoritmy, abychom mohli zprovoznit HW platformu do stavu pro testy a aplikace uzlů bezdrátové senzorické sítě. Dílčí problémy - úkoly jsou základní tyto:

1. generování nové platformy systému TinyOS,
2. implementace specifických ovladačů a komunikačního rozhraní platformy,
3. testy platformy,
4. konfigurace modulů XBee® a testy komunikace,
5. interakce s periferiemi, senzory a výstupy pro akční členy,
6. aktivní rozhraní sběru dat ze sítě a jejich vizualizace,
7. aplikace posílání dat do sítě

a úkoly rozšiřující

1. zpracování senzorických dat lokálně MCU uzlu,
2. testování funkcionality sítě v různých podmínkách a zatížení,
3. řešení chybových stavů, kontrola kvality služeb,
4. mapování oblasti pokrytí signálem s rozhraním pro inerciální navigaci,
5. lokalizace jednotlivých uzlů sítě,
6. simulace TinyOS aplikací v emulátoru AVRora a TOSSIM, experimentální měření parametrů sítě.

### 5.2.1 Operační systémy pro bezdrátové senzorické sítě

Pro řídicí funkce systému BSS lze použít mnoha systémově odlišných přístupů. Z hlediska systémového návrhu je ovšem vhodné použití strukturovaného, přenositelného a otevřeného software, zejména jde-li o systém, kde se očekává další rozšiřování, modifikace a testování rozmanitých aplikací.

Z hlediska nároku na množství požadovaných funkcí, které má každý uzel BSS plnit, lze například použít zcela jednoduchý, událostmi řízený, reaktivní a jednoúčelový program, který bude

- ▷ minimalistický v nárocích na paměť a výpočetní výkon, stabilní,
- ▷ vykazovat striktně deterministické chování,
- ▷ použitelný pouze na dané platformě a k danému účelu,
- ▷ s rostoucími aplikačními nároky a počtem změn se může stát obtížně modifikovatelný a udržitelný.

S rostoucím množstvím zpracovávaných událostí, potřebných funkcí a služeb se objem generovaného kódu dramaticky zvětšuje a tak dospějeme k potřebě postavit celý návrh na dobře strukturovaném, přehledném a ověřeném kódu s možností kooperativního zpracování úkolů a událostí. S rostoucí komplexitou kódu může potřebná malá změna funkcionality znamenat velké množství změn kódu a rostoucí riziko výskytu nových chyb [46].

Tímto se dostáváme k nutnosti volby a implementaci tzv. operačního systému, jádra systému, který má jasně definovanou a dokumentovanou strukturu, nabízející knihovny již testovaného kódu, služby a rozhraní pro aplikace uživatele a je přenositelný na různé HW platformy.

Abstrakcí a vrstvením jednotlivých funkčních částí kódu získáváme výhody ve:

- ▷ zvýšení bezpečnosti a spolehlivosti separací systémových a uživatelských částí kódu,
- ▷ zvýšení efektivity programování a opětovné použitelnosti kódu,
- ▷ snížení rizika generace nových chyb.

V principu lze BSS popsat jako distribuovaný, reaktivní, událostmi řízený systém. V takovém systému plní řídící software, operační systém, zejména tyto funkce:

- ▷ spravuje přístup prostřednictvím ovladačů k výkonným modulům procesoru a připojených periférií, (např. jeden nebo více čítačů/časovačů, komunikační rozhraní UART/SPI, atd.),
- ▷ reaguje na události (např. přerušení od časovače, změna hodnoty na vstupu GPIO, ADC),
- ▷ koordinuje zpracování aplikačních úkolů (plánuje časování dle priorit),
- ▷ obsluhuje komunikační rozhraní (vysílá data a odpovídá na žádosti),
- ▷ řídí systém správy napájení (adaptivně reguluje napájení periférií).

Stanovením obecných požadavků na operační systém bezdrátové senzorické sítě očekáváme především tyto vlastnosti:

- ▷ deterministické chování,
- ▷ definovaná časová odezva a řízení HW komponent,
- ▷ spolehlivost - dlouhá střední doba mezi poruchami MTBF,
- ▷ stabilní a definované nekolizní reakce na události,
- ▷ možnost dálkové správy OS a případné aktualizace,
- ▷ možnost instalace aplikací uživatele bez přerušení,
- ▷ minimální nároky na paměťové zdroje a energii.

Při návrhu a výběru řídícího software pro kontrolery uzlů bezdrátové senzorické sítě přicházejí v úvahu některé následující možnosti:

Tabulka 5.1: Porovnání operačních systémů

	Tradiční desktop OS	BSS OS
Architektura	mnoho procesů, vláken	jedno jádro, real-time
Správa paměti	součást CPU, MMU	omezená
Obsazení paměti	virtuální, neomezené	striktní dle možností CPU
I/O model	variabilní	sdílený
Energetická omezení	obvykle minoritní	dle aplikace, dominantní
Požadavky na HW	dle aplikace a dostupnosti	nízké náklady
Aplikační SW	uživatelsky přátelské	odezva v reálném čase

- a/ generovat zcela nový vlastní kód anebo operační systém - vhodné pro jednoduché, specifické nebo proprietární aplikace,
- b/ využít vlastních knihoven a modulů předchozích projektů - sdílení zdrojů a úspora času vývoje, ověřené vlastní technologie,
- c/ použít knihoven a modulů projektů publikovaných pod OSS licencemi - sdílení zdrojů a úspora času vývoje, ověřené technologie, nevýhoda: nutné zkoumání kódu a revize,
- d/ připojit svůj projekt k aktivnímu projektu OSS, využít kód již ověřený a sdílet zkušenosti vývojové komunity.

Přístup v bodech a/ a b/ je vhodný spíše pro menší anebo experimentální projekty bez časového omezení, nebo pro vývoj inovací. Jelikož je tato práce součástí akademického projektu, jenž se bude pravděpodobně dále rozvíjet, a bude důležitá podpora a sdílení zkušeností, nejvhodnější se nabízejí varianty návrhu v bodech c/ a d/.

Důvody vedoucí k použití specializovaného OS pro bezdrátové senzorické sítě jsou zejména:

- ▷ ověřený systémový návrh,
- ▷ aktivní vývoj nových komponent a služeb OS,
- ▷ spolehlivý optimalizující kompilátor,
- ▷ podpora uživatelské a vývojové komunity,
- ▷ výměna zkušeností a řešení problémů komunikací v diskusích.

Porovnání vlastností operačních systémů a systémů pro bezdrátové senzorické sítě shrnuje tab. 5.1.

### 5.2.2 Výběr operačního systému

Hlavními kritérii výběru operačního systému pro náš účel jsou:

- ▷ podpora volně dostupného vývojového prostředí,
- ▷ podpora pro 8-bitový MCU ATmega128,
- ▷ podpora výrobce, vývojové komunity,
- ▷ podpora komunikace rozhraním USART,
- ▷ podpora síťových služeb,
- ▷ plánovač, událostmi řízené zpracování,
- ▷ minimalistické nároky na programovou a operační paměť,
- ▷ minimální systémové jádro.

Průzkumem informačních zdrojů jsem získal přehled o dostupných veřejně distribuovaných operačních systémech, vhodných především pro naše uplatnění, splňujících výše uvedené podmínky.

Vyspělými kandidáty operačních systémů pro BSS, jejichž použití jsem zvažoval, jsou:

- ▷ Contiki [9] - OS pro osmibitové počítače a BSS, se síťovým protokolem RIME a TCP IPv6, lehká implementace vláken tzv. protothreads, podpora MCU MSP430, pro AVR podpora neaktivní, kompilace testovacího programu neproběhla bez problémů,
- ▷ NanoRK [18] - minimalistický OS s podporou plně preemptivního multitaskingu, prioritního plánování, platofrem FireFly a MicaZ,
- ▷ SOS [23] - úsporné jádro nabízející preemptivní multitasking, dynamickou instalaci programového kódu, síťové služby, s ukončeným vývojem,
- ▷ TinyOS [26] - jeden z prvních OS pro BSS, úsporné jádro a překladač, používá preprocesor dialektu jazyka C nesC, architektura založena na komponentech a rozhraních, nepodporuje multitasking, částečná podpora vláken (tosthreads), vynikající podpora v diskuzích, pokračuje vývoj a aktualizace, podporuje mnoho HW platforem, MCU ATmega128, MSP430, PXA270.

Všechny zdrojové texty OS jsou dostupné pod veřejnou licencí GNU GPL, není-li uvedeno v textech jinak.

### 5.2.3 Operační systém TinyOS

Jedním z prvních dostatečně rozšířených a specificky zaměřených operačních systémů pro vestavné systémy a bezdrátové senzorické sítě je TinyOS. Architektura TinyOS je výhodná pro událostmi řízené aplikace a velmi omezené hardwarové zdroje (jádro systému vyžaduje pouze cca 400 bytů paměti). Programovací model TinyOS je vystavěn na programovacím jazyku nesC, extenzi ANSI C, který podporuje mnohé důležité vlastnosti tohoto typu operačního systému. Jsou to:

- ▷ architektura založena na komponentech a abstrakcích,
- ▷ model souběžného (konkurenčního) zpracování událostí (events) a úkolů (tasks),
- ▷ model běhu fázováním kódu (split-phase operation),
- ▷ statické spojování kódu.

Počáteční verze TinyOS byly vyvíjeny týmem v University of California at Berkeley ve spolupráci s Intel Research [1]. V současnosti je dostupná verze 2.1.0 a vývoj stále pokračuje, především díky rozsáhlé komunitě programátorů a uživatelů.

### Instalace TinyOS v prostředí Linux

Nejsnazší metodou vedoucí k rychlému spuštění systému s funkčním TinyOS vývojovým prostředím je Linuxová distribuce Xubuntu, dostupná instalací z jednoho CD-ROM disku. Detailní popis instalace různými způsoby je dobře dokumentován v [26], pro rozsah zde neuvádím.

### Proces programování a kompilace

Cyklus návrhu, kompilace a testování na platformě TOS se příliš neliší od běžného cyklu programování aplikací pro nativní kód, neboť sestavení probíhá využitím systému GNU Make [make]. Sestavovací systém řídí celý proces preprocesoru nesC, přeloží .nc soubory do jednoho souboru ANSI C, kompilace C textu odpovídajícím křížovým kompilátorem a spojování do binárního kódu, resp. souboru ve formátu Motorola SREC, Intel HEX, ELF. Soubory pro nastavení make jsou umístěny v adresáři /tos /support /make.

Proces vývoje aplikací pro operační systém TinyOS probíhá ve vývojových cyklech:

1. návrh funkce aplikace, zacílení potřebných rozhraní a komponent, psaní zdrojového textu (.nc, .h),
2. spuštění procesu kompilace (make xbeet),
3. případné chyby odhalené v prvním běhu kompilace opravit, zpět na 2.,
4. kompilace proběhla bez chyb, programování cílového MCU přes JTAG nebo ISP,
5. spuštění programu, příp. emulace,
6. tester pozoruje chování MCU, příp. nastavuje breakpointy a vyhodnocuje běhové hodnoty a test,
7. proběhl-li test bez chyb, pokračujeme v psaní dalších funkcí na 1., jinak opravit chyby, zpět na 2.

Důležité soubory systému kompilace platformy: `.target` - popisuje platformu, `.platform` - ukazuje na adresáře, v nichž jsou umístěny soubory zaváděné do zdrojového stromu tvořící platformu při kompilaci.

Před spuštěním kompilace je nutné správné nastavení proměnné příkazem nebo uložením do souboru zdrojů pro shell (např. `.bashrc`):

```
$ export TOS_MAKEPATH="[cesta k adresáři platformy]/support/make"
```

kde jsou uloženy soubory `xbeeat.target` a `*.extra` se specifickým nastavením kompilace platformy.

### 5.2.4 Nástroje pro vývoj a programování

Veškeré nástroje pro vývoj aplikací v operačním systému TinyOS jsou součástí balíku `tinyos-2.1.0.deb` v distribuci Linux Debian, případně distribuci Xubuntu s kompletní instalací TinyOS. Používal jsem převážně tento operační systém v kombinaci s MS Windows2000 s přístupem přes SSH. Zdrojové texty jsem sestavoval v editorech PSPad a mcedit.

### 5.2.5 Platforma XBeeAT pro TinyOS

Instalací TinyOS na specifický hardware (portací) našeho typu (ATmega128 + XBee) vytvoříme novou platformu v pojetí TinyOS. Tento proces je částečně popsán v [4], je nezbytný pro zavedení a rozpoznání zdrojového kódu této platformy do stromové struktury TinyOS a kompilací vlastních aplikací. Soubory popisují novou platformu, předávají kompilačním nástrojům nastavení specifické pro daný systém. TOS platforma poskytuje kód a definice, umožňující tvůrci realizovat aplikace pro danou platformu. Platformu v TinyOS definuje sada souborů zdrojového kódu a konfigurací. Fyzickou platformu tvoří soubor čipů (chips), hardwarových obvodů, které mohou být či jsou součástí MCU nebo mohou být připojeny zevně, ale jsou funkční součástí systému. Současně jsou v kódu TinyOS tyto čipy reprezentovány komponenty (odpovídajícími ovladači). Často používané nebo vhodné čipy (jejich ovladače) mohou být takto (použity) sdíleny mezi různými platformami a implementování nové platformy je věcí propojení těchto ovladačů novým způsobem. Je-li třeba použít nový chip (zatím neimplementovaný ovladač ve zdroji textu TinyOS) je nutné napsat odpovídající ovladač a zavést jeho rozhraní do stromu zdrojových textů. Pro každý čip, jenž potřebujeme zpřístupnit, vytvoříme ovladač a abstrakci dle doporučení pro abstrakční, prezentační a příp. nezávislou vrstvu.

Minimální požadavky pro funkční platformu jsou soubory:

- ▷ `PlatformC.nc`, `PlatformP.nc` a `SubPlatformC.nc`, `SubPlatformP.nc` komponenty jsou odpovědné za start platformy do stavu použitelného aplikací

**Text 5.1** Inicializace vstupních a výstupních portů ATmega128 v implementaci komponenty SubPlatform

---

```

module SubPlatformP {
  provides interface Init as PlatformInit;
  uses interface Init as SubInit;
  implementation {
    command error_t PlatformInit.init() {
      // D I/O port pins inputs for buttons pull down gnd
      PORTD = 0xFF;
      DDRD = 0x00; // set as inputs
      // B I/O port pins as output
      PORTB = 0xFF; // hi = leds off
      DDRB = 0xFF; // set as outputs
      // D I/O port pins inputs for buttons pull down gnd
      PORTE = 0x00;
      DDRE = 0xFC; // set 2 3 out
      // B I/O port pins as output
      PORTF = 0xFF; //
      DDRF = 0xFF;
      // Place here eventual application-specific init
      return call SubInit.init(); }
    default command error_t SubInit.init() {
      return SUCCESS; } }

```

---

Naše nová platforma pojmenovaná XBeeAT je specifická v použití hardwarových prostředků. Pro přehled jde o:

- ▷ modul XBee - definice a implementace rozhraní API pro paketovou sériovou komunikaci,
- ▷ modul tlačítek a LED - definice ovládání LED a detekce změny stavu tlačítek,
- ▷ definice a ovládání ADC a funkce přístupu a nastavení ADC.

Umístění souborů nové platformy je v cestě

```
$TOSROOT/tinyos-2.x-contrib/xbeeat/
```

kde \$TOSROOT je proměnná cesty ke kořenovému adresáři umístění instalace TinyOS.

Abychom tyto součásti zpřístupnili pro aplikace, musíme navrhnout komponenty a deklarovat jejich interface. Dokumentace pro nové platformy TinyOS [4] doporučuje minimální soubor pravidel. Naše platforma je příbuzná komerčně dostupnému uzlu MICA [31], taktéž na bázi MCU ATmega128. Některá nastavení můžeme z této platformy převzít, nová rozhraní však musíme navrhnout vlastní, neboť obsazení pinů a konfigurace periférií je odlišné.

Klíčové generické komponenty, důležité pro každou platformu, jsou čítače a časovače (Timers [5]). Interface časování charakterizuje jejich:



- ▷ délka (8 až 32 bit), definující počet bitů registru čítače a tím také max. dobu přetečení časovače,
- ▷ přesnost (určitost) - znamená rozlišení časovače v kvantizačních jednotkách (ms,  $\mu$ s), vyjádřená v binárních jednotkách za jednu sekundu  $\Rightarrow 1 \text{ s} = 1\,024 \text{ bin ms}$  (děliče a čítače v ATmega128 jsou pouze binární),
- ▷ správnost časovače vzhledem k nastavené přesnosti = schopnost dosáhnout přesně reálného času dělením daného časovače, např.  $1 \text{ MHz} / 1\,024$  potom správnost je tedy 97.6%. Jedna binární sekunda je tedy  $1 \mu\text{s} * 1\,024 = 1\,024\,000 \mu\text{s} = 1.024 \text{ ms}$ , chyba je tedy 2.4 % vůči reálnému času.

ATmega128 poskytuje 4 časovače / čítače, dva 8 bitové a dva 16 bitové. Základová deska MVS má osazeny krystalové rezonátory na frekvencích 14 736,5 kHz pro systémový takt a 32 768Hz pro Timer0. Při inicializaci systému (v rámci Boot.init()) funkcí `Atm128Calibrate.cyclesPerJiffy()` v modulu `MeasureClockC` je měřen počet systémových cyklů během jedné periody ( $1/32768 \text{ s}$ ) přetečení časovače Timer0 a výsledek je dále použit pro nastavení konstant virtuálních časovačů a komunikačních modulů UART.

### 5.2.6 Ovladače

Ovladače periférií jsou klíčovou částí programového kódu, neboť umožňují aplikacím interakci s okolím. Ovladače periferních modulů musejí být efektivně naprogramované a testované jak z hlediska rychlosti odezvy tak i z hlediska spolehlivosti. Je nepřípustné, aby chyba ovladače způsobila zhroucení běhu celého systému. TinyOS má standardně implementovány téměř všechny ovladače periferních modulů MCU ATmega128. Před použitím komponent ovladačů je nezbytné se seznámit s deklaracemi rozhraní a dokumentací [5]. Některé periferie jsou sdílenými zdroji (např. ADC) s dělenou fází zpracování a je vhodné k nim přistupovat přes rozhraní `Resource` ke sdílení přístupu.

#### TinyOS ovladač rozhraní XBee

Jak je popsáno v předchozí kapitole, komunikace s moduly XBee® může být buď transparentní, kdy data na sériovém rozhraní jsou automaticky odesílána rádiovým rozhraním, nebo v módu API, kdy data formátuje protokol HDLC - PPP, jak je popsáno v kap. 4.2.4. Zatímco první možnost je vhodná pouze pro podobné aplikace jako např. náhrada sériového RS232 propojení drátovými vodiči rádiovým spojením, API komunikace je důležitá pro implementaci rozsáhlejší sítě a umožní dobře definovaný a zabezpečený přenos sériovým rozhraním. Pro tento účel bylo nutné vytvořit ovladač komunikace mezi TinyOS a XBee moduly. V TinyOS jsou ovladače nahrazeny tzv. abstrakcemi hardwarových prvků (chip abstraction). Toto řešení dovoluje zpřístupnit hw rozhraní, izolovat vnitřní specifický

kód ovladače a sdílet jej mezi různými platformami. Při sestavování nového ovladače jsem vycházel z abstrakcí a rozhraní ovladače pro přenos sériovým rozhraním UART, které jsou umístěny v /tos /system /lib /serial a současně rozšířil návrh platformy Tinybotics [29], jejíž autor se pokusil o adaptaci protokolu pro XBee. Publikované soubory ve zdrojovém stromu TinyOS však nejsou kompletní nebo ve fázi nedokončené.

Na úrovni HDLC enkodéru byl původní komponent SerialP rozšířen o řízení toku (XON/XOFF) a únikové (escape) sekvence. API struktura rámce je odlišná pro rámce komunikační a konfigurační, detailní popis struktury jednotlivých typů rámců je v dokumentaci modulů[32]. Tyto odlišné struktury spravuje komponent Dispatcher užitím vyrovnávací paměti. Potvrzování doručení paketů není použito, neboť bude zajištěno již MAC a vyššími síťovými vrstvami. Zdrojové texty ovladače sériové komunikace XBee® jsou dostupné v adresáři /xbeeat /tos /chips /xbee. Nastavení rozhraní UART a presentace pro ostatní komponenty je v komponentě PlatformXBC.nc. Tato rozhraní může použít kterýkoli jiný komponent a získá tak konektivitu kompatibilní s jinými platformami TinyOS a ActiveMessage rozhraním. Diagram relací komponent a rozhraní nového ovladače sériové komunikace API XBee ukazuje obr. 5.3, obdélníky reprezentují komponenty a moduly, elipsy a hrany poskytovaná nebo použitá rozhraní.

Formát rámce XBee API sestává ze sekvence následujících polí:

Pole	F	MSB	LSB	DATA	CRC
Počet Byte	1	1	1	4 - n	1

- ▷ F - oddělovač začátku rámce, začátek paketu (1B) (0x7E) - zpracuje XBTranslate,
- ▷ MSB - MSB délky (1B) - XBP,
- ▷ LSB - LSB délky (1B) - XBDispatcher,
- ▷ DATA - datový obsah ( 4 - n B) - XBDispatcher,
- ▷ CRC - 8 bit CRC (1B) - XBP.

Abychom mohli plně využít XBee pro vyšší síťové vrstvy, je třeba rozhodnout o způsobu adresování a nastavení XBee® modulů. XBee® podporuje tři MAC módy, nastavitelné příkazem ATMMx, pro x:

- ▷ x=0: Maxstream (Digi) mód MAC, proprietární, rozšiřující hlavičku rámce a další data pro detekci duplicity a identifikátory,
- ▷ x=1: standardní IEEE®802.15.4 mód bez potvrzování,
- ▷ x=2: standardní IEEE®802.15.4 mód s potvrzováním.

K zajištění kompatibility s modemy jiných výrobců je vhodné (nikoli nutné) nastavit mód ATMM2 s potvrzením, případně ATMM1.

Adresování v sítích XBee® je popsáno v kap. 4.2.3, máme výběr ze dvou možností: přímé adresování (unicast), kde adresní pole datagramu obsahuje jedineč-

nou identifikaci adresáta, nebo hromadné adresování (broadcast), kde adresní pole datagramu je nastaveno na obecnou adresu (0x0000FFFF).

Bude-li potřeba monitorovat provoz v síti nezávislým XBee® modulem (např. pro detekci kolizí a chybovosti), je nezbytné použít broadcast adresování. To proto, že XBee® vrstva MAC při nastavení přímé unicast adresy cíle (adresáta) filtruje vždy pakety s adresou odlišnou od lokální, tzn. neshoduje-li se adresa cíle příchozího paketu s adresou lokální přijímacího uzlu, paket se dále nezpracovává a neodesílá na sériové rozhraní. Naproti tomu, broadcast pakety s adresou cíle 0xFFFF přijmou všechny uzly (v dosahu signálu) a předají sériovým rozhraním (obdoba módu "promiscuous" v ethernetu 802.2).

Filtrace paketů však může být příznivá, neboť nezatíží vyšší síťové vrstvy (zpracované v dalších MCU za sériovým rozhraním) pakety, které nebudou dále zpracovány. Pro implementaci síťových vrstev topologií typu mesh a MH je však broadcast adresování nutné; adresování se aplikuje ve vyšších vrstvách než MAC (tedy mimo MCU v modulu XBee®).

Komponenty přistupují k polím paketu pouze přes rozhraní (interface). Tato rozhraní poskytují operace nastavení nebo předání hodnoty (např. `getPayload()`). Přístup k jednotlivým položkám struktury `message_t` se uskutečňuje voláním odpovídající funkce rozhraní. Z důvodu minimalizace operací s pamětí alokované pro instrukce `message_t` a efektivity přístupu různých linkových vrstev k položkám `message_t`, je začátek datové oblasti (payload) vždy na fixní adrese (v paměti) vůči začátku bufferu pro `message_t`.

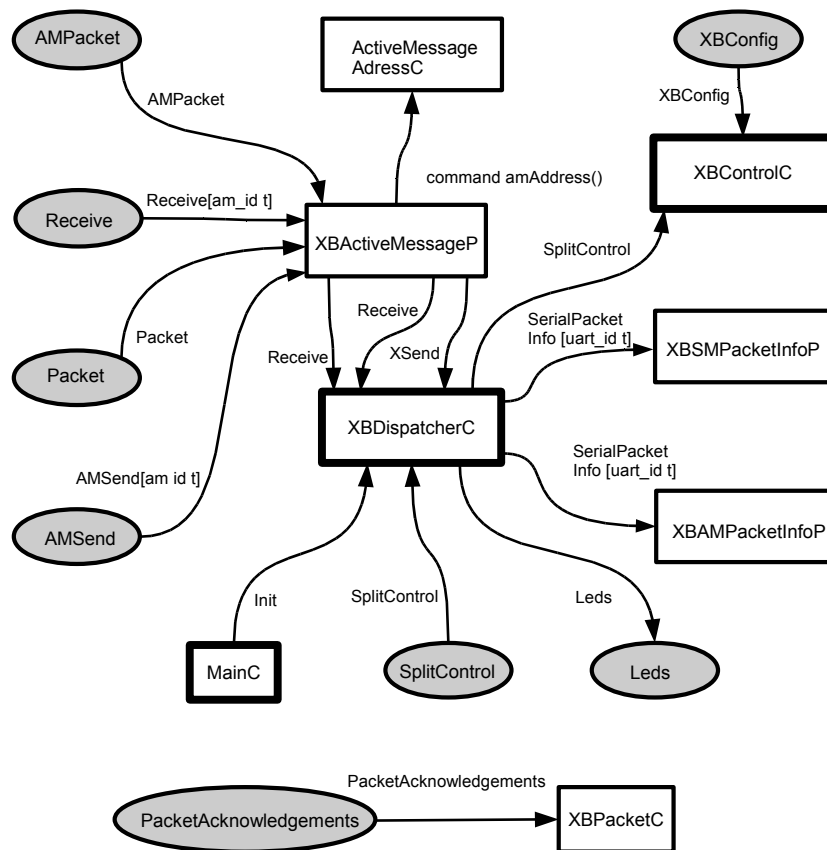
Délka datové oblasti je implicitně nastavena preprocesorovou konstantou `TOSH_DATA_LENGTH` na hodnotu 28 byte a lze ji změnit v nastavení platformy nebo přepínačem `-DTOSH_DATA_LENGTH=x` při kompilaci. Moduly XBee® dovolují max. délku datové oblasti 100 B. Délku datové oblasti `ActiveMessage` bufferu `message_t` lze tedy nastavit až na velikost `[100 - (délka hlavičky) - (délka metadata)]`.

### Standardní ovladač sériové komunikace v TinyOS

Standardní ovladač sériové komunikace je konstruován ve čtyřech vrstvách, každá z těchto vrstev zajišťuje specifickou úroveň zapouzdření dat a poskytuje přístup vrstvám vyšší úrovně funkcemi a ukazateli na datové oblasti. Detailní popis tohoto rozhraní je v [2]. Vlastní struktura paketu odpovídá protokolu HDLC/PPP, často používanému k formátování datových toků, popis rozhraní pro paketovou komunikaci je v [25].

Struktura vrstev standardního ovladače sériové komunikace je v Tab. 5.2.

Formát rámce standardního ovladače sériové komunikace sestává ze sekvence následujících polí:



Obrázek 5.3: Diagram relací komponent a rozhraní ovladače sériové komunikace TinyOS a XBee

Tabulka 5.2: Struktura vrstev standardního ovladače sériové komunikace TinyOS

VRSTVA	KOMPONENT	POPIS
ActiveMessage	SerialActiveMessageC	abstrakce nezávislá na platformě, generický komponent
Dispatcher	SerialDispatcherC	formátuje a ukládá datový tok do message_t datové struktury
Protocol	SerialP	protokol HDLC dvěma rozhraními Send- ReceiveBytePacket, přidává potvrzování
Encoder	HDLCTranslateC	připojuje kódování a detekci pro vyšší vstupu HDLC
UartC	raw UART	nejnižší vrstva poskytuje přístup k UART rozhraní MCU na úrovni jednotlivých bytů

Pole	F	P	S	D	DATA	CRC	F
Počet Byte	1	1	1	1	n	2	1

- ▷ F - oddělovač rámce, začátek paketu (1B) (0x7E),
- ▷ P - typ protokolu (1B),
- ▷ S - sekvenční pořadí (1B),
- ▷ D - typ formátu packetu pro Dispatcher (1B),
- ▷ DATA - vlastní datový obsah (nB),
- ▷ CRC - 16 bit CRC (2B),
- ▷ F - oddělovač rámce, začátek paketu (1B) (0x7E).

Úpravou struktury rámce a mapováním některých položek bylo dosaženo slučitelnosti mezi parametry ActiveMessage konfigurace a parametry pro MAC vrstvu XBee. Porovnáním struktury tohoto paketu a rámce XBee API dostáváme rozdíly patrné v těchto specifikacích:

- ▷ API rámec začíná 16 bitovým specifikátorem délky a je ukončen kontrolním součtem délky 8 bitů, kalkulovaným dle [32],
- ▷ identifikace PAN sítě (PAN ID) je mapována na nastavení AM group ID,
- ▷ adresovací mód 16 bitový (parametry DL, DH odpovídají hodnotě AM adresy),
- ▷ délka datové oblasti je nastavena na 64 bytů a lze ji změnit v čase kompilace v definici TOSH\_DATA\_LENGTH preprocesoru,
- ▷ implicitní číslo kanálu je 26.

### 5.2.7 Testování funkcí platformy

Součástí vývojového cyklu software je fáze testování a verifikace [46], abychom ověřili správnost a navrhovanou funkcionalitu komponent a interface řídicího software, potřebujeme několik testovacích aplikací.

Počáteční oživení a testy nové platformy byly prováděny po částech spouštěním jednotlivých testů periferií a pozorováním odezvy. Spojováním testů do rámce jednoho proveditelného kódu ověřujeme případné vzájemné kolize a chyby. Zdrojové texty testů s popisem a kompilovaný kód jsou uloženy v adresáři /tos /apps.

Významnou částí příslušenství programového vybavení jsou nástroje pro správu, konfiguraci, monitorování a testování jak sítě, tak technologických prvků. Pro bezdrátové senzorické sítě jsem se nesešel s žádnými doporučeními ani standardy pro tyto metody nebo nástroje, lze ale vycházet z již velmi dobře ověřených doporučení např. pro protokoly rozsáhlých sítí, včetně IP.

### 5.2.8 Konfigurace uzlů

Konfigurace parametrů uzlů a řídicího software probíhá staticky v době překladu nastavenými konstantami a makry preprocesoru. Před instalací modulu XBee® do adaptéru je nutné nastavit jeho základní komunikační parametry. Nezbytné je nastavení rychlosti sériového rozhraní na 57 600 nebo 115 200 kb/s souhlasně s nastavením rychlosti UART ATmega128 konstantou PLATFORM\_BAUDRATE v hardware.h, hodnoty PANID (3333 implicitně), čísla komunikačního kanálu např. 1A (26 dec) shodně s ostatními moduly v logické síti. Je třeba pamatovat na rozdíl mezi moduly XBee® a XBee-PRO® v počtu komunikačních kanálů a výstupního výkonu. Pro moduly XBee® jsou k dispozici všechny kanály definované IEEE® 802.15.4 0x0B - 0x1A, zatímco pro XBee-PRO® je rozsah kanálů omezen na 0x0C - 0x17. Pokročilejší řešení bude tyto parametry nastavovat během inicializace systému TinyOS, detekcí typu modulu.

### 5.2.9 Návrh komunikačního rozhraní

V současné etapě návrhu, zadavatel požaduje připojení jednoho uzlu sítě k osobnímu počítači. Tento uzel bude vybaven aplikací pro komunikaci s ostatními uzly a navíc musí zabezpečit předávání dat (rámců formátu ActiveMessage). Tato data budou posílána druhým sériovým rozhraním UART1 mikrokontroléru, připojeným přes převodník úrovně RS232 do sériového rozhraní osobního počítače. V PC budou data dále zpracovávána, případně předávána do jiné sítě.

Uzel připojený k PC nazveme bránou (GW, gateway), neboť plní funkci přístupu mezi různými sítěmi. Přes tuto bránu potekou všechna data mezi PC a ostatními uzly. Aplikace instalovaná v tomto uzlu musí zabezpečit předávání, příp. filtrování jednotlivých rámců mezi rozhraními XBActiveMessage a SerialActiveMessage a jejich potvzování. Ačkoliv je možné, aby aplikace, jímž bude brána vybavena, pracovala zcela samostatně i bez připojení k PC pracovní stanici, záměr zadavatele a předpokládaný charakter aplikace s připojením PC počítá.

Řešení brány dat má dvě varianty:

- ▷ A. připojení kořenového uzlu k PC, kde komunikaci mezi sítí senzorů a PC zprostředkuje řídicí MCU s aplikací brány (forwarderu) v obou směrech,
- ▷ B. funkce řídicího MCU a jeho aplikaci přeneseme do aplikace pod operačním systémem PC, k rozhraní RS232 je modul XBee připojen přímo adaptérem a převodníkem úrovně. Výhoda této varianty spočívá v úspoře jednoho řídicího modulu MCU a adaptéru propojení, nepožadujeme-li, aby kořenový uzel zpracovával data autonomně bez PC.

## Časování přenosu

Při rozvaze o limitech počtu odesílaných paketů a přenosových rychlostech je nutné znát časové konstanty komunikace. Pro naše aplikace je nastavena komunikační rychlost UART na 115200 kb/s, příp. 57600 kb/s. Doby potřebné k přenosu jednoho bitu a 100 bytů při délce 10 bitů na přenos jednoho bytu shrnuje následující tabulka.

	57600 kb/s	115200 kb/s
1 bit	17,36 $\mu$ s	8,68 $\mu$ s
100 Byte	17,36 ms	8,68 ms

### 5.2.10 Topologie a směrování

Variety topologií jsou dány vlastnostmi použitých modulů XBee®, jak popisuje kap. 4.2. Moduly XBee® SeriesI umožňují komunikaci Peer-to-Peer nebo hvězda s koordinátorem. Tyto topologie jsou použitelné v jednodušších konfiguracích a sítích menšího prostorového rozsahu bez směrování, neboť plošný rádius sítě je dán dosahem rádiového spojení (cca 50 m). Rozšíření sítě je možné do konfigurace ad-hoc topologie mesh pouze s vyšší sítíovou vrstvou v řídicím software MCU.

Alternativou je použití modulů XBee® DigiMesh, které komunikují v topologii mesh, kde každý modul pracuje jako směrovač (router). Z pohledu uživatele je toto řešení výhodné v jednoduchosti instalace sítě a dispozici zátěže řídicího MCU pro úkoly jiné než sítíové komunikace. Nevýhoda spočívá v nemožnosti ovlivnit parametry směrovacího protokolu s úmyslem např. optimalizace vlastností sítě a v proprietárním protokolu.

Transportní a sítíové vrstvy mají úkol zajistit efektivní doručování datagramů všem prvkům sítě, zejména aktivně sledují tyto procesy:

- ▷ konzistence datagramů,
- ▷ hledání a údržba optimálních cest v síti,
- ▷ zajištění kontinuity,
- ▷ detekce a lokalizace poruch sítě.

V oblasti směrovacích protokolů probíhá neustálý vědecký výzkum při hledání optimálních algoritmů pro rozmanité typy sítí [41] [28].

Problém nalezení jakékoliv vhodné či optimální cesty od zdrojového uzlu k uzlu cílovému řeší směrovací algoritmy. Vlastní doručování datagramů od zdroje k cíli pak zajišťuje směrovací protokol, jenž zapouzdřuje směrovací algoritmus s datovou strukturou datagramu a informace potřebné k předávání datagramů.

Podle způsobu aktivity hledání vhodných cest sítí rozlišujeme tyto přístupy:

- ▷ reaktivní - reaguje na žádost odesílatele (zdroje) a vyhledává dle potřeby vhodnou cestu, ukládá min. informaci o okolních uzlech,
- ▷ proaktivní - nalezené cesty ukládá do směrovací tabulky a k modifikaci dochází při iniciaci nebo poruše uzlů sítě.

V systému TinyOS jsou standardně implementovány tyto směrovací protokoly:

1. CTP - Collection Tree Protocol [3], poskytuje službu kolekce dat ze sítě typu strom na bázi reaktivního protokolu AODV [47],
2. MultiHop - zajistí doručení datagramu mezi dvěma uzly nalezením vhodné cesty přes více směřujících uzlů,
3. TYMO - varianta protokolu DYMO.

### 5.2.11 Návrh sběru dat a vizualizace

Na rozhraní centrálního uzlu (brány) a PC budou příchozí síťové datové rámce k dispozici na sériovém rozhraní RS232. Vhodnou aplikací je bude možné číst na úrovni jednotlivých Bytů, dekodovat rámce HDLC, analyzovat anebo ukládat do souboru či databáze pro pozdější zpracování nebo archivaci.

Sběr dat uzlů sítě prostřednictvím jednoho uzlu (kolektoru, koordinátora, brány) je de facto primární funkcí bezdrátové senzorické sítě z hlediska uživatele. Jednotlivé uzly senzorické sítě konfigurované pro potřebu jejich funkce v síti či místě měření posílají data zpravidla adresované obecně uzlu, který je deklarován a konfigurován jako kolektor dat (současně může fungovat jako brána). Odesílání datagramů senzorickými uzly může být dějem periodickým, nebo náhodným, to závisí na konkrétní aplikaci, použitému protokolu přístupu k médium (MAC), hustotě a zatížení sítě, periodě vzorkování senzorů nebo reakcí na události.

K provozu sítě potřebujeme tři aplikace:

- ▷ pro jednotlivé senzorické uzly,
- ▷ pro kolektor (bránu) senzorické sítě,
- ▷ pro PC nebo PDA, kde poběží aplikace pro přímou interakci s uživatelem (správcem) sítě.

#### Aplikace koncových uzlů

Aplikace Sense běžící v MCU senzorického uzlu zaznamenává periodicky hodnoty AD převodníku sekvenčně tři kanálů ADC1-3 s implicitní periodou 200 ms, kterou lze dálkově změnit, do vyrovnávací paměti (buffer). Příchodem události Read.Done() ukládá data do bufferu a po naplnění připraví buffer k odeslání modulem XBee (rozhraním XBActiveMessage.AMSend()). Odeslání datagramu signalizuje rozsvícením LED7 a přijetím LED6. Současně s hodnotami AD převodníku



se do bufferu periodicky ukládá hodnota PortD, kde jsou připojena tlačítka. Datová struktura definovaná v souboru sense.h aplikace Sense ukládaná do bufferu datové oblasti paketu XBee API vypadá takto:

```
typedef nx_struct sense {
    nx_uint16_t ver; /* verze aktualizace intervalu */
    nx_uint16_t interval; /* perioda vzorkování */
    nx_uint16_t id; /* identifikace uzlu */
    nx_uint16_t count; /* pocet vzorkovacich intervalu */
    nx_uint8_t read[NREADINGS]; /* pole hodnot */
} sense_t;
```

Pro příklad, jeden kompletní rámec XBActiveMessage s datovým polem read[1]=AA délky 1 byte se programem sflisten zobrazí hexadecimálně takto:

7E 00 22 01 0B FF FF 01 F0 00 00 01 00 00 01 00 0A AA 34,

kde byte 7E je oddělovač rámce, následují pole MSB, LSB dle specifikace API, bytem F0 začíná pole AMaddress a dále pokračují položky struktury sense\_t. Rámec končí kontrolním součtem 34.

Software kolektoru (brány) je shodné s aplikací senzorickou, navíc je vybavena přeposíláním všech datagramů přicházejících z modulu XBee®, pracuje jako most (bridge).

### Aplikace na PC

Osobní počítač bude plnit funkce uživatelského rozhraní vizualizace, analýzy a záznamu příchozích dat z brány. Současně lze posílat datagramy v opačném směru do sítě k ovládání periférií uzlů či změnám konfigurace. Brána a PC jsou elektricky propojeny rozhraním RS232. Příchozí data brány (senzorů) můžeme ukládat do souboru nebo zobrazit terminálovým software, ovšem datové rámce XBee® API a ActiveMessage jsou binárních hodnot, tedy přímo nečitelné a obtížně vizuálně interpretovatelné. Abychom tato data mohli vnímat ve srozumitelné formě, musíme zařadit dekodér rámců API a ActiveMessage a interpret datových polí a vhodnou formou data zobrazovat buď v textové nebo grafické formě. Přehled dílčích softwarových komponent:

1. vizualizační rozhraní,
2. software (proxy) pro sdílení sériového portu přes TCP/IP,
3. dekodér API rámců,
4. interpret binárních senzorických dat,
5. interpret příkazů uživatele a enkodér API/ ActiveMessage rámců.

Operační systémy Linux ani Windows neumožňují přímé sdílení portů RS232, pouze jeden klient může otevřít ovladač portu. Tento nedostatek řeší aplikace SerialForwarder, pracující jako zástupné rozhraní (proxy) mezi RS232 a aplikacemi schopnými TCP/IP komunikace. Více aplikací může současně přistupovat k RS232, brána do bezdrátové senzorické sítě nemusí být přímo připojena ke stroji, kde bude uživatelské rozhraní a umožní přístup z kterékoli sítě (internetu). SerialForwarder je součástí TinyOS, existuje ve verzi Java s GUI i ve verzi C/C++ a spouští se příkazem

```
sf <port> <device> <baudrate>
```

kde <port> je číslo portu, na němž bude SF naslouchat, <device> je systémové označení sériového portu (např. /dev/ttyS0) a <baudrate> je nastavení rychlosti pro sériový port. Příklad spojení SerialForwarderu a sflisten:

```
root@eliscino ~ # sf 999 /dev/ttyS0 57600 //start SerialForwarder
clients 1, read 0, wrote 1
clients 0, read 0, wrote 2
root@eliscino ~ # sflisten 192.168.1.11 999 & //na portu 999
root@eliscino ~ # sfsend 127.0.0.1 999 123 //odeslání (123)
```

Součástí balíku SerialForwarder jsou i tyto programy pro textový mód příkazového interpretu (shell):

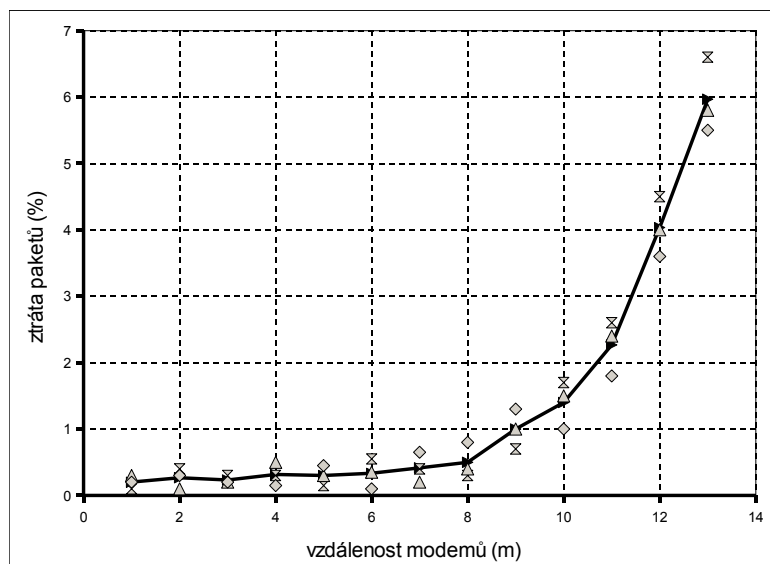
- seriallisten: výstupem je reprezentace datagramů přijatých sériovým portem,
  - sflisten: výstupem je reprezentace datagramů přijatých přes SerialForwarder,
  - prettylisten: výstupem je textová reprezentace datagramů a dekodovaná ze standardního formátu hlavičky ActiveMessage,
  - sfsend: pošle datagram specifikovaný na příkazové řádce do SerialForwarderu
- SerialForwarder lze spustit i v OS Windows pod Cygwin s instalací TinyOS.

### Aplikace správy a vizualizace

S testovací aplikací Sense, běžící na koncových uzlech, spolupracuje Java GUI aplikace označená Oscilloscope pro zobrazení příchozích dat a posílání datagramů jednotlivým uzlům. Další aplikací používanou pro sledování, komunikaci a vizualizaci senzorických sítí je projekt Octopus [19].

Po konzultaci s vedoucím práce byl učiněn návrh aplikace přístupu a vizualizaci senzorických dat v prostředí Matlab® [16]. Toto řešení je výhodné v přístupu síťovým protokolem TCP/IP, možností rychlého návrhu uživatelského rozhraní a zároveň velkému množství funkcí pro další zpracování dat.

Zajímavým vizualizačním prostředím je Processing [22]. Jde o knihovnu Java tříd, zaměřenou na programování především vizuálních a multimediálních aplikací



Obrázek 5.4: Chybovost na úrovni paketů v závislosti na vzdálenosti modemů

v interakci s uživatelem a reakcí na data, přijatá z různých zdrojů. Výstupem kompilace je Java byte-code applet, který lze spouštět běžnými metodami v appletviewer nebo distribuovaně a zobrazením HTTP prohlížečem.

### Návrh ovládání periferií

Ovládání periferií připojených k MCU (senzorů, výstupů) realizujeme přístupem prostřednictvím ovladačů periferních modulů MCU. V aplikacích použijeme rozhraní pro nastavení indikace LED (interface Leds), pro snímání stavu tlačítek modulu 8LED8Btn (interface Btn). Přístup k AD převodníku zprostředkuje interface Read<uint16\_t> a ReadStream<uint16\_t> (configuration AdcReadStreamClientC(), komponentu DemoSensorC, HPL interface HplAtm128Adc).

#### 5.2.12 Měření chybovosti paketů

Pro zjištění spolehlivosti komunikace modulů XBee jsem učinil měření závislosti ztrát datagramů na vzdálenosti dvou modemů. Podmínky měření byly stejné jako při měření zisku antén v kapitole 3.4.

V každém bodě měření byly počítány odeslané a přijaté pakety délky 32 byte ve třech měřicích intervalech, v každém intervalu odesláno po 100 paketech a zjištěné ztráty v minimální, maximální a průměrné hodnotě vyneseny do grafu na obr. 5.4.



## 6 Závěr

Představená platforma na bázi vývojového systému (MVS) s MCU ATmega128, modulů XBee a ve spojení s operačním systémem TinyOS představuje univerzální řešení pro experimenty a ověřování vlastností senzorické sítě s možností ovládání a sběru dat vzdálených periférií.

Cílem mé práce byl návrh a implementace nové modulární platformy pro bezdrátovou senzorickou síť.

Úvodní části práce podávají přehled vlastností bezdrátových senzorických sítí s přihlédnutím k metodice návrhu.

Další kapitola přibližuje základní definice standardu IEEE®802.15.4 pro zařízení bezdrátových senzorických sítí.

Moduly XBee® jsou představeny ve zvláštní kapitole a ověřili jsme některé jejich deklarované vlastnosti.

Byla prověřena problematika šíření signálu prostředím, vliv na spolehlivost přenosu dat a vlastnosti použité antény. Měřením směrové charakteristiky unipólové antény modulu XBee a její úpravou byl potvrzen předpoklad o její vyzařovací charakteristice.

Praktické řešení nové platformy vzešlo z koncepce a návrhu adaptéru propojení desky vývojového systému a modulů XBee® a dalšími perifériemi.

Navrhl jsem testy pro ověření funkcionality jednotlivých systémových prvků, periférií a komunikace, připojení centrálního uzlu (brány) k PC pro sběr dat, vizualizaci a ovládání periférií.

Výsledky měření ztrát datagramů v závislosti na vzdálenosti a síle signálu podávají přehled o fundamentální závislosti, s níž je nutné počítat při navrhování sítí s danou spolehlivostí.

Práce je pilotním projektem v nové oblasti budování senzorických sítí a může pomoci pro rozšíření možností bezdrátové datové komunikace s využitím otevřené platformy.



# Literatura

- [1] College of the Atlantic, University of California at Berkeley and Intel Research Laboratory at Berkeley: Habitat Monitoring on Great Duck Island. 2004. Dostupné z: <http://www.greatduckisland.net>.
- [2] *TinyOS TEP 113: Serial Communication* [online]. 2009. Dostupné z: <http://www.tinyos.net/tinyos-2.x/doc/html/tep113.html>.
- [3] *TinyOS TEP 123: The Collection Tree Protocol (CTP)* [online]. 2009. Dostupné z: <http://www.tinyos.net/tinyos-2.x/doc/html/tep123.html>.
- [4] *TinyOS TEP 131: Creating a New Platform for TinyOS 2.x* [online]. 2009. Dostupné z: <http://www.tinyos.net/tinyos-2.x/doc/html/tep131.html>.
- [5] *TinyOS TEP 2: Hardware Abstraction Architecture* [online]. 2009. Dostupné z: <http://www.tinyos.net/tinyos-2.x/doc/html/tep2.html>.
- [6] Úřad pro technickou metrologii: *Sborník dokumentů technické normalizace* [online]. 2003. Dostupné z: <http://web.unmz.cz>.
- [7] ZigBee alliance: ZigBee protocol definition. Dostupné z: <http://www.zigbee.org>.
- [8] CadSoft EAGLE Layout Editor [online]. Dostupné z: <http://www.cadsoft.de>.
- [9] *The Contiki Operating System* [online]. Dostupné z: <http://www.sics.se/contiki/>.
- [10] Český telekomunikační úřad [online]. 2007. Dostupné z: <http://www.ctu.cz>.
- [11] Český telekomunikační úřad: VO-R/10/03.2007-4 [online]. 2007. Dostupné z: [http://www.ctu.cz/1/download/OOP/Rok\\_2007/VO\\_R\\_10\\_03\\_2007\\_4.pdf](http://www.ctu.cz/1/download/OOP/Rok_2007/VO_R_10_03_2007_4.pdf).
- [12] Český telekomunikační úřad: VO-R/12/08.2005-34 [online]. 2005. Dostupné z: [http://www.ctu.cz/1/download/OOP/Rok\\_2007/VO\\_R\\_12\\_08\\_2004\\_34.pdf](http://www.ctu.cz/1/download/OOP/Rok_2007/VO_R_12_08_2004_34.pdf).
- [13] CygWin [online]. Dostupné z: <http://www.cygwin.org>.
- [14] Digi Inc. [online]. 2009. Dostupné z: <http://www.digi.com>.
- [15] grml: *Linux for sysadmins, texttool-users, geeks* [online]. Dostupné z: <http://grml.org/>.

- [16] *Matlab by MathWorks* [online]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com>.
- [17] Moravská zemská knihovna. Dostupné z: <http://www.mzk.cz>.
- [18] *Nano-RK: A Wireless Sensor Networking Real-Time Operating System* [online]. Dostupné z: <http://www.nanork.org/>.
- [19] *Octopus: A Dashboard for Sensor Networks Visual Control* [online]. Dostupné z: <http://www.csi.ucd.ie/content/octopus-dashboard-sensor-networks-visual-control>.
- [20] *Open ZigBee* [online]. Dostupné z: <http://www.openzb.org>.
- [21] *PKDesign* [online]. 2008. Dostupné z: <http://www.pk-design.net>.
- [22] *processing.org project* [online]. Dostupné z: <http://www.processing.org>.
- [23] *SOS Operating System* [online]. Dostupné z: <https://projects.nesl.ucla.edu/public/sos-2x/doc/>.
- [24] *ST Microelectronics* [online]. Dostupné z: <http://www.st.com/>.
- [25] *TinyOS TEP116 Packet Protocols* [online]. Dostupné z: <http://www.tinyos.net/tinyos-2.x/doc/html/tep116.html>.
- [26] *TinyOS documentation* [online]. Dostupné z: <http://docs.tinyos.net/>.
- [27] ATMEL – CORPORATION. *AVR Microcontroller ATmega128L Reference Manual* [online]. Dostupné z: <http://www.atmel.com/>.
- [28] BALAKRISHNAN, H. et al. A comparison of mechanisms for improving TCP performance over wireless links. *IEEE/ACM Transactions on Networking*. 1997, 5, s. 756–769.
- [29] BORDIGNON, M. *TinyBotics: enabling Networked Embedded Robotics* [online]. Dostupné z: <http://www.tinybotics.net>.
- [30] CITESEERX. *CiteSeerx - a scientific literature digital library* [online]. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu>.
- [31] CROSSBOW TECHNOLOGY, I. *Wireless Sensor Networks* [online]. Dostupné z: <http://www.xbow.com>.
- [32] DIGI. *XBee/XBeePRO 2.4 OEM RF Modules - Product Manual* [online]. 2009. Dostupné z: [http://ftp1.digi.com/support/documentation/90000982\\_A.pdf](http://ftp1.digi.com/support/documentation/90000982_A.pdf).
- [33] EMBER. *ZigBee chipset* [online]. Dostupné z: <http://ember.com>.
- [34] FREESCALE. *MC13213* [online]. Dostupné z: [http://www.freescale.com/files/rf\\_if/doc/data\\_sheet/MC13213.pdf](http://www.freescale.com/files/rf_if/doc/data_sheet/MC13213.pdf).
- [35] FREESCALE. *MC9S08GB/GT Data Sheet*, 2008. Dostupné z: [http://www.freescale.com/files/microcontrollers/doc/data\\_sheet/MC9S08GB60.pdf](http://www.freescale.com/files/microcontrollers/doc/data_sheet/MC9S08GB60.pdf).



- [36] FREESCALE. *MMA7260QT: 3-Axis Acceleration sensor* [online]. Dostupné z: [http://www.freescale.com/files/sensors/doc/data\\_sheet/MMA7260QT.pdf](http://www.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MMA7260QT.pdf).
- [37] GAY, D. et al. *nesC 1.1 Language Reference Manual*. Dostupné z: <http://nesc.sourceforge.net/papers/nesc-ref.pdf>.
- [38] GUPTA, P. – KUMAR, P. The capacity of wireless networks. *IEEE Trans. Inf. Theory*, IT-46(2). 2000.
- [39] GUPTA, P. – KUMAR, P. R. *The Capacity of Wireless Networks*. 1999.
- [40] IEEE. *IEEE802.15.4 Std, Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)*, 2006. Dostupné z: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4-2006.pdf>.
- [41] INTANAGONWIWAT, C. – GOVINDAN, R. – ESTRIN, D. Directed Diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks. In *MOBICOM*, s. 56–67. ACM, 2000.
- [42] JOHNSON, D. B. – MALTZ, D. A. Dynamic source routing in ad hoc wireless networks. In *Mobile Computing*, s. 153–181. Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [43] MOTEIV. *Tmote Sky datasheet* [online]. Dostupné z: <http://www.moteiv.com>.
- [44] NETWORK WORKING GROUP, I. *PPP in HDLC Framing, Request for Comments: 1549* [online]. 1993. Dostupné z: <http://www.ietf.org/rfc/rfc1549.txt>.
- [45] ORFANIDIS, S. *Electromagnetic Waves and Antennas*. Rutgers University, 2002.
- [46] PATTON, R. *Testování software*. Computer press, 2002.
- [47] PERKINS, C. E. Ad-hoc on-demand distance vector routing. In *In Proceedings of the 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, s. 90–100, 1999.
- [48] RAIDA, Z. *Vysokofrekvenční technika a antény*. FEKT, VUT Brno, 2006.
- [49] SHOREY, R. – ANANDA, A. *MOBILE, WIRELESS AND SENSOR NETWORKS*. John Wiley and Sons, 2006.
- [50] VOORS, A. *NEC based antenna modeler and optimizer* [online]. Dostupné z: <http://home.ict.nl/~arivoors/>.



# Seznam obrázků

2.1	Blokové funkční schéma typického uzlu bezdrátové senzorické sítě	6
2.2	Blokové schéma typického technologického vybavení uzlu bezdrátové senzorické sítě . . . . .	7
2.3	Závislost příkonu $y$ :[mA] mikrokontroléru ATmega128 na systémovém kmitočtu $x$ :[MHz] (převzato z dokumentace Atmel [27]) . . . .	9
2.4	Závislost propustnosti na pravděpodobnosti odesílání pro MAC s náhodným přístupem k médiu . . . . .	12
3.1	Topologie definované standardem IEEE802.15.4 . . . . .	17
3.2	Topologie sítě typu hvězda . . . . .	18
3.3	Topologie sítě s možností multi-hop, P2P . . . . .	19
3.4	Závislost bitové chybovosti (BER) na poměru signálu k šumu (SNR) různých modulačních standardů. . . . .	20
3.5	Kmitočet komunikačních rádiových kanálů (zdroj [40]) . . . . .	21
3.6	Alokace kmitočtového pásma ISM 2,5 GHz . . . . .	22
3.7	Vrstvy dle OSI/ISO pro IEEE802.15.4 . . . . .	24
3.8	Typická závislost síly elektromagnetického pole [dBm] na vzdálenosti antén [m] v nehomogenním prostředí . . . . .	26
3.9	Modely antén modulu XBee, vlevo originální, vpravo s úpravou . .	28
3.10	Směrová charakteristika antény Whip (a) (vlevo) a s úpravou (b) modulu XBee ve vertikální rovině. . . . .	29
3.11	Měřená směrová charakteristika antény Whip v horizontální rovině před (vlevo) a po úpravě protiváhy unipólu. . . . .	30
4.1	Porovnání modulů XBee® a XBee-PRO® . . . . .	35
4.2	Blokové schéma interní struktury modulu XBee® Series I . . . . .	36
4.3	Výkres a rozměry modulů XBee® (převzato z dokumentace [32]) .	37
4.4	Stavový diagram pracovních módů modulů XBee® . . . . .	40
4.5	Formát API rámce . . . . .	41
4.6	Komunikační stavy modulů XBee® . . . . .	42
5.1	Schéma vývojového prostředí pro platformu XBeeAT TinyOS . . .	46
5.2	Blokové schéma adaptéru XBeeAT . . . . .	47
5.3	Diagram relací komponent a rozhraní ovladače sériové komunikace TinyOS a XBee . . . . .	60
5.4	Chybovost na úrovni paketů v závislosti na vzdálenosti modemů .	67



# Seznam tabulek

2.1	Třídy platform uzlů bezdrátové senzorické sítě . . . . .	11
4.1	Přiřazení a popis signálů a vývodů XBee® . . . . .	37
5.1	Porovnání operačních systémů . . . . .	52
5.2	Struktura vrstev standardního ovladače sériové komunikace TinyOS	60

## SEZNAM ZKRATEK

AES advanced encryption standard, šifrovací standard  
AODV Ad-Hoc On Demand Distance Vector, reaktivní směrovací protokol  
BER bit error rate, četnost chyb bitové úrovně  
BPSK binary phase-shift keying, binární fázová modulace  
BSS bezdrátové senzorické sítě  
CCA clear channel assessment, metoda odhadu přístupu  
CPU Central processing unit, centrální procesorová jednotka  
CSMA-CA carrier sense multiple access with collision avoidance, pravděpodobnostní protokol přístupu k médiu  
CTP Collection Tree Protocol, protokol sběru dat sítě typu strom  
DSSS Direct sequence spread spectrum, typ modulace rozprostřením frekvenčního spektra přímou sekvencí  
EIRP equivalent isotropic radiated power, ekvivalentní izotropicky vyzářený výkon  
FFD full-function device, zařízení s plnou funkcionalitou  
GPL General public licence, veřejná licence  
GTS guaranteed time slot, zaručená časová mezera  
GW Gateway, síťové rozhraní, brána do jiné sítě  
HW Hardware, technické, fyzické vybavení  
IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers  
JTAG Joint Task Action Group  
LQI link quality indication, indikátor kvality spoje  
LR-WPAN low-rate wireless personal area network, bezdrátová síť osobního dosahu  
MAC medium access control, řízení přístupu k médiu  
MCU Microcontroller unit, mikrokontrolér

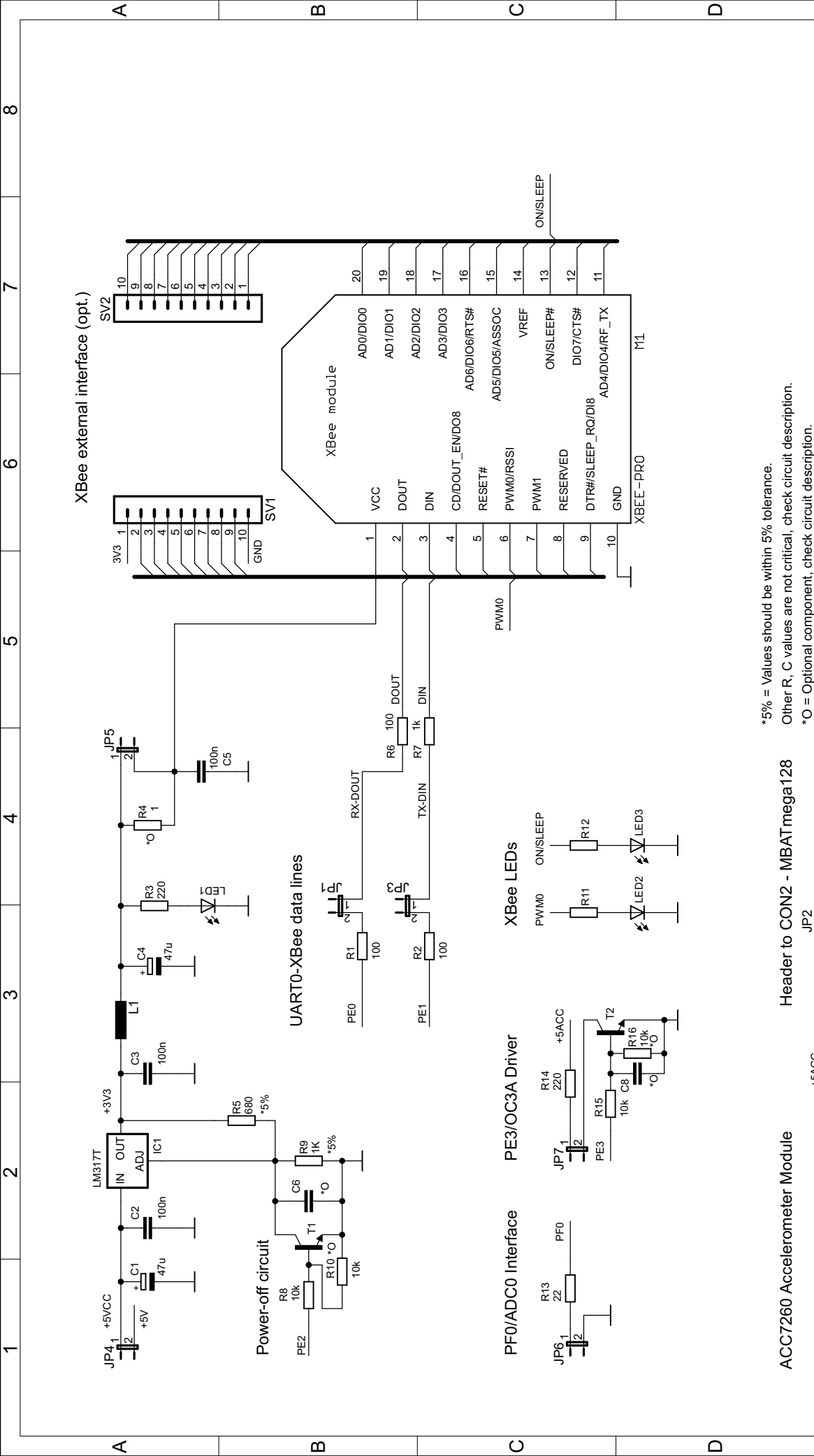
MMU Memory management unit, jednotka správy paměti  
O-QPSK offset quadrature phase-shift keying, fázové modulace  
OS operační systém OSI open systems interconnection  
OSS Open Source Software  
PAN personal area network, síť osobního dosahu  
PC personal computer, osobní počítač  
PER packet error rate, četnost chyb paketů  
PHY physical layer, fyzická vrstva  
RFD reduced-function device, zařízení s omezenou funkcionalitou  
RSSI Received Signal Strength Indicator, indikátor síly přijímaného signálu  
RT Real-time, reálný čas  
RTT Round Trip Time, doba průchodu dat k cíli a zpět  
RX receive, receiver, přijímat, přijímač  
SW Software, programové vybavení  
TX transmit or transmitter, vysílat nebo vysílač  
UART universal asynchronous receiver transmitter, rozhraní sériové komunikace  
WLAN wireless local area network, bezdrátová síť místního dosahu  
WPAN wireless personal area network, bezdrátová síť osobního dosahu  
WSN Wireless sensor network, bezdrátová senzorická síť

## **SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha A: Schéma zapojení adaptéru propojení

Příloha B: Návrh desky plošných spojů

Příloha C: CD-ROM



VUT FME Brno		7		8	
Author: Tomas Jansta		7		8	
Date: 01/2009		7		8	
Project: Master's thesis - Sensor network node		7		8	
XBee - main board ATmega128 interface board		7		8	
Sheet: 1/1		7		8	

\*5% = Values should be within 5% tolerance.  
Other R, C values are not critical, check circuit description.  
\*O = Optional component, check circuit description.

Header to CON2 - MBATmega128

ACC7260 Accelerometer Module

